



Estudo numérico de juntas adesivas em T com substratos de alumínio

JOÃO PEDRO MOURA LOPES

julho de 2020

ESTUDO NUMÉRICO DE JUNTAS ADESIVAS EM T COM SUBSTRATOS DE ALUMÍNIO

João Pedro Moura Lopes

1170015

2020

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

ESTUDO NUMÉRICO DE JUNTAS ADESIVAS EM T COM SUBSTRATOS DE ALUMÍNIO

João Pedro Moura Lopes

1170015

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Professor Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

2020

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

JÚRI

Presidente

Doutor Jorge Américo Oliveira Pinto Belinha

Professor Adjunto, ISEP

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Arguente

Doutor Ricardo João Camilo Carbas

Professor Auxiliar Convidado, FEUP

PALAVRAS CHAVE

Adesivo estrutural, Juntas adesivas, Juntas em T, Método de Elementos Finitos, Modelos de dano coesivo.

RESUMO

As ligações adesivas têm vindo a desempenhar um papel bastante importante na ligação de diferentes estruturas. Existem indústrias que estão cada vez mais a apostar neste tipo de ligações, como é o caso da indústria aeronáutica, aeroespacial e automóvel. As ligações adesivas são frequentemente utilizadas na fabricação de estruturas com geometria complexa com a finalidade de proporcionar uma ligação estrutural que, em teoria deveria ter pelo menos a mesma resistência do que o material de base. Por outro lado, existem esforços que, quando aplicados em substratos de menor espessura, podem originar esforços prejudiciais à ligação, como por exemplo os esforços de arrancamento. No entanto, algumas geometrias podem melhorar a resistência da ligação ao arrancamento, como é o caso de juntas adesivas T de reforço. As principais vantagens destas juntas são o aumento de rigidez da estrutura de base e a minimização dos picos de tensão de arrancamento.

O objetivo desta dissertação é estudar numericamente juntas adesivas em T, com diferentes geometrias e sujeitas ao arrancamento, utilizando modelos de dano coesivo (MDC). Para isso foram utilizados três adesivos estruturais com diferentes propriedades e substratos em liga de alumínio. A espessura de adesivo (t_a) foi considerada constante. As variáveis estudadas foram a espessura do substrato da base (a), a espessura do T (t), o comprimento de sobreposição (l) e o raio do T (r). Numa primeira fase, foi efetuada uma validação experimental da técnica usada nesta dissertação (MDC) através de um trabalho já realizado. O trabalho referido consistiu num estudo em juntas T, formadas por dois componentes em L aplicados simetricamente, solicitadas a esforços de arrancamento, com com diferentes espessuras de L (t_{p2}) e com dois tipos de adesivos diferentes. De um modo geral, foi possível concluir que, para todos os valores de t_{p2} , os resultados numéricos apresentaram bom acordo com os experimentais. O trabalho numérico realizado focou-se na análise de juntas em T, incluindo análises de tensões na junta, o estudo da variável de dano no adesivo, a previsão da resistência e a previsão da energia dissipada com recurso a um *software* que utiliza o Método dos Elementos Finitos (MEF) e MDC. Como conclusão, verificou-se que o adesivo com elevada ductilidade (Sikaforce® 7752) é recomendado para este tipo de solicitação, devido à capacidade de distribuir tensões sobre uma maior área, o que traduziu em valores mais elevados de força máxima. Por outro lado, foi possível compreender em detalhe o efeito de cada variável geométrica utilizada.

KEYWORDS

Structural adhesive, Adhesive joints, T joints, Finite Element Method, Cohesive zone models.

ABSTRACT

Adhesive joints have been playing a very important role to join different structures. There are industries that are increasingly betting on these types of joints, such as the aeronautical, aerospace and automotive industries. Adhesive joints are often used in the manufacture of structures with complex geometry in order to provide a structural bond that, in theory, should have at least the same strength as the base material. On the other hand, there are loads that, when applied to thinner substrates, can lead to damaging stresses on the bond, such as peel stresses. However, some geometries can improve the joint strength to peel, as is the case with T reinforcement adhesive joints. The main advantages of these joints are the increased stiffness of the base structure and the minimization of peak peel stresses.

The objective of this dissertation is to numerically study T-adhesive joints, with different geometries and subjected to peel loads, using cohesive zone models (CZM). For this, three structural adhesives with different properties and adherends in aluminum alloy were used. The thickness of the adhesive (t_a) was considered constant. The studied variables were the base adherend thickness (a), the T thickness (t), the overlap length (l) and the T radius (r). In a first phase, an experimental validation of the technique used in this dissertation (CZM) was undertaken through a previous work. The referred work consisted of a study in T joints, formed by two L-shaped components applied symmetrically, loaded in peel, with different L thicknesses (t_{p2}) and with two different types of adhesives. In general, it was possible to conclude that, for all t_{p2} values, the numerical results showed good agreement with the experimental ones. The numerical work carried out focused on the analysis of T-joints, including joint stress analysis, study of the damage variable in the adhesive, strength prediction and dissipated energy prediction using software that uses the Finite Element Method (FEM) and CZM. In conclusion, it was found that the adhesive with high ductility (Sikaforce® 7752) is recommended for this type of application, due to the ability to distribute stresses over a larger area, which translated into higher values of maximum load. On the other hand, it was possible to understand in detail the effect of each geometric variable used.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

Al	Alumínio
ASTM	<i>American society for testing and materials</i>
Cr	Crômio
Cu	Cobre
DCB	<i>Double-cantiveler beam</i>
ENF	<i>End-notched flexure</i>
Fe	Ferro
GSS	<i>Grid Stiffened Structures</i>
JSS	Junta de sobreposição simples
MDC	Modelos de dano coesivo
MEF	Método de elementos finitos
MEFX	Método de elementos finitos estendido
Mg	Magnésio
Mn	Manganês
SDEG	<i>Stiffness Degradation</i>
Si	Silício
TAST	<i>Thick Adherend Shear Test</i>
Ti	Titânio
Zn	Zinco

Lista de Símbolos

a (mm)	Espessura da base
E (GPa)	Módulo de Young
G (GPa)	Módulo de elasticidade transversal
G_c (N/mm)	Resistência à fratura
G_I (N/mm)	Taxa de libertação de energia
G_{Ic} (N/mm)	Tenacidade à tração
G_{II} (N/mm)	Taxa de libertação de energia
l (mm)	Comprimento de sobreposição
L_0	Comprimento do adesivo
P (N)	Força resistente da junta T
$P_{máx}$ (N)	Força máxima resistente da junta T
r (mm)	Raio da junta T
t (mm)	Espessura da junta T
t_a (mm)	Espessura de adesivo
t_n^0 (MPa)	Resistência coesiva à tração
t_s^0 (MPa)	Resistência coesiva ao corte
U (J)	Energia dissipada
x (mm)	Distância entre extremidades do adesivo
x/l	Distância normalizada ao longo do comprimento do adesivo
γ_f (%)	Deformação de rotura ao corte
δ (mm)	Deslocamento resultante da solicitação à tração da junta
ε_f (%)	Deformação de rotura à tração

σ (MPa)	Tensão normal à tração
σ_e (MPa)	Tensão de cedência à tração
σ_f (MPa)	Tensão de rotura à tração
σ_y (MPa)	Tensão de arrancamento
$\sigma_y / \sigma_{méd}$	Tensão de arrancamento normalizada
τ_f (MPa)	Tensão de rotura ao corte
τ_{xy} (MPa)	Tensão de corte
$\tau_{xy} / \sigma_{méd}$	Tensão de corte normalizada
δ_n^0 (mm)	Deslocamento correspondente à resistência coesiva à tração (mm)
δ_s^0 (mm)	Deslocamento correspondente à resistência coesiva ao corte (mm)
ν	Coeficiente de Poisson

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Ligação aparafusada, soldada e adesiva [2].	9
Figura 2 - Distribuição de tensões numa junta adesiva sujeita ao corte [7].	10
Figura 3 - Vista em corte de um motor de avião usando painéis sandwich colados [8].	10
Figura 4 - Distribuição de tensões em ligações rebitadas e em ligações adesivas [3].	11
Figura 5 - Comprimento de sobreposição (l) numa junta de sobreposição simples [7].	13
Figura 6 - Comparação da resistência entre adesivo dúctil e frágil (elaboração própria).	13
Figura 7 - Duas possíveis configurações de juntas adesivas [7].	14
Figura 8 - Aplicações de juntas adesivas no avião SAAB 340 - fuselagem, asas e cauda [3].	15
Figura 9 - Esquema da fuselagem traseira de um avião [9].	16
Figura 10 - Exemplo de aplicação de adesivo com auxílio de robôs [11].	17
Figura 11 - Cinco modos fundamentais de carregamento em ligações adesivas [7].	17
Figura 12 – Tipos de roturas em juntas adesivas [3].	18
Figura 13 - Diferentes geometrias de juntas [4].	19
Figura 14 - Soluções para a diminuição de clivagem em juntas de reforço [2].	20
Figura 15 - Junta em L e T [2].	21
Figura 16 - Juntas adesivas de reforço em avião [3].	22
Figura 17 - Elemento da carroçaria de um automóvel [18].	22
Figura 18 - a) painel GSS com reforços curvos, b) perfil do painel (mm) [19].	23
Figura 19 - Geometrias consideradas no estudo [19].	23
Figura 20 – Junta em L [20].	23
Figura 21 – Junta em L sujeita a três carregamentos (P_x , P_y e M) e condições fronteira [20].	24
Figura 22 - Tensões normais para os três carregamentos a) P_x b) P_y e c) M [20].	24
Figura 23 - Dois tipos de geometrias T - a) Tipo-I, b) Tipo-II [15].	25
Figura 24 - a) Condições fronteira e ponto de carga aplicada, b) montagem das amostras [15].	26
Figura 25 - Os cinco tipos de juntas T utilizadas (mm) [21].	26
Figura 26 - Curvas força-deslocamento para os cinco tipos de juntas [21].	27
Figura 27 - Média das forças de rotura e áreas médias de colagem [21].	27

Figura 28 - Morfologia das cinco superfícies após falha da ligação [21].	28
Figura 29 – Configuração e dimensões (mm) da junta L sujeita a tensões de arrancamento [22].	28
Figura 30 - Modelo de elementos finitos e condições fronteira [22].	29
Figura 31 - Análise das tensões médias de arrancamento (experimental, numérica e analítica) [22].	30
Figura 32 - Geometria da junta T (mm) [23].	30
Figura 33 - Componentes usados na junta [23].	31
Figura 34 - Análise da junta por MEF [23].	31
Figura 35 - Curvas P - δ para cada tipo de junta em T [23].	32
Figura 36 - Curvas P - δ para os três tipos de junta T após reparação [23].	32
Figura 37 - Modelo coesivo triangular [51, 52].	36
Figura 38 - Representação das tensões usando o MEFX em JSS: iniciação do dano do adesivo nas extremidades de sobreposição (a) e crescimento dano do substrato de alumínio (b) [65].	38
Figura 39 - Geometria da junta e respetivos parâmetros analisados (t_{p2}) [66].	42
Figura 40 - Exemplo de junta fabricada pelo autor [66].	42
Figura 41 - Equipamento utilizado e encastramento do substrato base [66].	43
Figura 42 - Curvas P - δ : a) $t_{p2}=1$ mm; b) $t_{p2}=2$ mm; c) $t_{p2}=3$ mm e d) $t_{p2}=4$ mm [66].	44
Figura 43 – Superfície de rotura das juntas adesivas com $t_{p2}=1$ mm [66].	44
Figura 44 - Valores experimentais de $P_{máx}$ obtidos nas juntas adesivas com Araldite® AV138 e Araldite® 2015 [66].	45
Figura 45 – Comparação das curvas P - δ experimentais e numéricas: a) $t_{p2}=1$ mm; b) $t_{p2}=2$ mm; c) $t_{p2}=3$ mm e d) $t_{p2}=4$ mm [66].	46
Figura 46 - Representação da junta estudada.	47
Figura 47 - Vista isométrica da junta.	47
Figura 48 - Curvas σ - ϵ da liga de alumínio AW6082 T651 - experimental e numérica [13].	48
Figura 49 – Curvas σ - ϵ experimentais - Araldite® AV138 [13].	49
Figura 50 - Curvas σ - ϵ experimentais - Araldite® 2015 [13].	50
Figura 51 - Curva σ - ϵ experimental - SikaForce® 7752 [73].	51
Figura 52 - Modelo numérico com o detalhe das partições para construção da malha.	52
Figura 53 - Imagem do <i>software</i> ABAQUS® com as partições definidas e a representação dos parâmetros.	52
Figura 54 - Esquema representativo das condições fronteira.	53

Figura 55 - Valores de incrementação no <i>software</i> ABAQUS®	53
Figura 56 - Malha refinada para a análise da resistência.	54
Figura 57 - Malha refinada para a análise de tensões.	54
Figura 58 - Modelo adesivo triangular [51, 52].	56
Figura 59 – Representação do comprimento normalizado x/l na junta T.	58
Figura 60 – Tensões $\sigma_y/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de a (Araldite® AV138).	59
Figura 61 - Tensões $\sigma_y/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de a (Araldite® 2015).	59
Figura 62 - Tensões $\sigma_y/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de a (SikaForce® 7752).	60
Figura 63 - Tensões $\sigma_y/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de t (Araldite® AV138).	61
Figura 64 - Tensões $\sigma_y/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de t (Araldite® 2015).	61
Figura 65 - Tensões $\sigma_y/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de t (SikaForce® 7752).	62
Figura 66 - Tensões $\sigma_y/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de l (Araldite® AV138).	63
Figura 67 - Tensões $\sigma_y/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de l (Araldite® 2015).	63
Figura 68 - Tensões $\sigma_y/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de l (SikaForce® 7752).	64
Figura 69 - Tensões $\sigma_y/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de r (Araldite® AV138).	65
Figura 70 - Tensões $\sigma_y/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de r (Araldite® 2015).	65
Figura 71 - Tensões $\sigma_y/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de r (SikaForce® 7752).	66
Figura 72 - Tensões $\tau_{xy}/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de a (Araldite® AV138).	67
Figura 73 - Tensões $\tau_{xy}/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de a (Araldite® 2015).	67
Figura 74 - Tensões $\tau_{xy}/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de a (SikaForce® 7752).	68
Figura 75 - Tensões $\tau_{xy}/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de t (Araldite® AV138).	69
Figura 76 - Tensões $\tau_{xy}/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de t (Araldite® 2015).	69
Figura 77 - Tensões $\tau_{xy}/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de t (SikaForce® 7752).	70
Figura 78 - Tensões $\tau_{xy}/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de l (Araldite® AV138).	71
Figura 79 - Tensões $\tau_{xy}/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de l (Araldite® 2015).	71
Figura 80 - Tensões $\tau_{xy}/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de l (SikaForce® 7752).	72
Figura 81 - Tensões $\tau_{xy}/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de r (Araldite® AV138).	73
Figura 82 - Tensões $\tau_{xy}/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de r (Araldite® 2015).	73
Figura 83 - Tensões $\tau_{xy}/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de r (SikaForce® 7752).	74
Figura 84 – Variável de dano SDEG para os diferentes valores de a no instante $P_{máx}$ (Araldite® AV138). ..	75

Figura 85 - Variável de dano SDEG para os diferentes valores de a no instante $P_{\text{máx}}$ (Araldite® 2015).	76
Figura 86 - Variável de dano SDEG para os diferentes valores de a no instante $P_{\text{máx}}$ (SikaForce® 7752)... ..	76
Figura 87 - Variável de dano SDEG para os diferentes valores de t no instante $P_{\text{máx}}$ (Araldite® AV138). ..	77
Figura 88 - Variável de dano SDEG para $t=0,5$ mm no instante de $P_{\text{máx}}$ (Araldite® AV138).....	78
Figura 89 - Variável de dano SDEG para os diferentes valores de t no instante $P_{\text{máx}}$ (Araldite® 2015).	78
Figura 90 - Variável de dano SDEG no instante $P_{\text{máx}}$ (Araldite® 2015): a) $t=1$ mm e b) $t=1,5$ mm.....	79
Figura 91 - Variável de dano SDEG para os diferentes valores de t no instante $P_{\text{máx}}$ (SikaForce® 7752). ..	79
Figura 92 - Variável de dano SDEG no instante $P_{\text{máx}}$ (SikaForce® 7752): a) $t=0,5$ mm e b) $t=2,5$ mm.	80
Figura 93 - Variável de dano SDEG para os diferentes valores de l no instante $P_{\text{máx}}$ (Araldite® AV138)....	81
Figura 94 - Variável de dano SDEG para os diferentes valores de l no instante $P_{\text{máx}}$ (Araldite® 2015).	81
Figura 95 - Variável de dano SDEG para $l=40$ mm no instante $P_{\text{máx}}$ (Araldite® 2015).	82
Figura 96 - Variável de dano SDEG para os diferentes valores de l no instante $P_{\text{máx}}$ (SikaForce® 7752)....	83
Figura 97 - Variável de dano SDEG para os diferentes valores de r no instante $P_{\text{máx}}$ (Araldite® AV138). ..	83
Figura 98 - Variável de dano SDEG para os diferentes valores de r no instante $P_{\text{máx}}$ (Araldite® 2015).	84
Figura 99 - Variável de dano SDEG para os diferentes valores de r no instante $P_{\text{máx}}$ (SikaForce® 7752). ..	85
Figura 100 - Curva $P-\delta$ para os diferentes valores de a (Araldite® AV138).	86
Figura 101 - Curva $P-\delta$ para os diferentes valores de a (Araldite® 2015).....	87
Figura 102 - Curva $P-\delta$ para os diferentes valores de a (SikaForce® 7752).	87
Figura 103 – Valores de $P_{\text{máx}}$ para os diferentes valores de a	88
Figura 104 - Curva $P-\delta$ para os diferentes valores de t (Araldite® AV138).	89
Figura 105 - Curva $P-\delta$ para os diferentes valores de t (Araldite® 2015).	90
Figura 106 - Curva $P-\delta$ para os diferentes valores de t (SikaForce® 7752).	91
Figura 107 - Valores de $P_{\text{máx}}$ para os diferentes valores de t	91
Figura 108 - Curva $P-\delta$ para os diferentes valores de l (Araldite® AV138).	92
Figura 109 - Curva $P-\delta$ para os diferentes valores de l (Araldite® 2015).	93
Figura 110 - Curva $P-\delta$ para os diferentes valores de l (SikaForce® 7752).	94
Figura 111 - Valores de $P_{\text{máx}}$ para os diferentes valores de l	94
Figura 112 - Curva $P-\delta$ para os diferentes valores de r (Araldite® AV138).	95
Figura 113 - Curva $P-\delta$ para os diferentes valores de r (Araldite® 2015).	96
Figura 114 - Curva $P-\delta$ para os diferentes valores de r (SikaForce® 7752).	97

Figura 115 - Valores de $P_{\text{máx}}$ para os diferentes valores de r	97
Figura 116 – Valores da energia dissipada para os diferentes valores de a	98
Figura 117 - Valores da energia dissipada para os diferentes valores de t	99
Figura 118 - Valores da energia dissipada para os diferentes valores de l	100
Figura 119 - Valores da energia dissipada para os diferentes valores de r	100

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Efeito da preparação superficial na resistência de juntas adesivas [4].	15
Tabela 2 – Propriedades mecânicas da liga 2060-T e do adesivo EA9394 [21].	26
Tabela 3 - Propriedades mecânicas dos materiais utilizados [22].	29
Tabela 4 - Parâmetros usados e os respectivos valores.	47
Tabela 5 - Composição química da liga de alumínio AW 6082-T651.	48
Tabela 6 - Propriedades mecânicas da liga AW6082 T651 [13].	48
Tabela 7 - Propriedades mecânicas e de fratura do Araldite® AV138 [13, 70, 72].	49
Tabela 8 - Propriedades mecânicas e de fratura do Araldite® 2015 [13, 70, 72].	50
Tabela 9 - Propriedades mecânicas e de fratura do SikaForce® 7752 [73].	51
Tabela 10 - Parâmetros coesivos em tração e corte para os três adesivos.	57

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Contextualização	3
1.2	Objetivos	3
1.3	Organização da dissertação	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1	Ligações adesivas	9
2.1.1	Caracterização das juntas adesivas	10
2.1.2	Aplicações comuns das juntas adesivas	15
2.1.3	Esforços e modos de rotura em juntas adesivas	17
2.1.4	Configurações possíveis de junta	19
2.2	Juntas adesivas de reforço	20
2.2.1	Aplicações.....	21
2.2.2	Tipos de carregamento.....	23
2.2.3	Trabalhos experimentais	25
2.2.4	Trabalhos numéricos	28
2.3	Previsão de resistência de juntas adesivas	33
2.3.1	Modelos analíticos	33
2.3.2	Métodos numéricos	33
2.3.2.1	Mecânica dos meios contínuos.....	34
2.3.2.2	Mecânica da fratura.....	34
2.3.2.3	Modelos de dano coesivo (MDC) e as suas leis	35
2.3.2.4	Mecânica do dano.....	36
2.3.2.5	Método de Elementos Finitos Estendido (MEFX)	37
3	DESENVOLVIMENTO	41

3.1	Validação experimental.....	41
3.1.1	Materiais utilizados	41
3.1.2	Geometria das juntas	41
3.1.3	Processo de fabrico	42
3.1.4	Ensaio das juntas	43
3.1.5	Resultados obtidos	43
3.1.5.1	Curvas P- δ	43
3.1.5.2	Modos de rotura	44
3.1.5.3	Resistência das juntas	45
3.1.5.4	Comparação de resultados	45
3.2	Trabalho numérico	46
3.2.1	Geometria das juntas	47
3.2.2	Materiais	48
3.2.2.1	Alumínio AW6082-T651	48
3.2.2.2	Araldite® AV138	49
3.2.2.3	Araldite® 2015	50
3.2.2.4	SikaForce® 7752	51
3.2.3	Condições da análise numérica	51
3.2.4	Modelo de dano coesivo	55
3.2.5	Leis coesivas para simulação do adesivo	57
3.2.6	Análise de tensões na junta	58
3.2.6.1	Tensões de arrancamento	58
3.2.6.1.1	Espessura da base	58
3.2.6.1.2	Espessura do T	60
3.2.6.1.3	Comprimento de sobreposição	62
3.2.6.1.4	Raio do T	64
3.2.6.2	Tensões de corte	66
3.2.6.2.1	Espessura da base	66
3.2.6.2.2	Espessura do T	68
3.2.6.2.3	Comprimento de sobreposição	70

3.2.6.2.4	Raio do T	72
3.2.7	Estudo da variável de dano	74
3.2.7.1	Espessura da base	74
3.2.7.2	Espessura do T	77
3.2.7.3	Comprimento de sobreposição.....	80
3.2.7.4	Raio do T	83
3.2.8	Previsão da resistência	85
3.2.8.1	Espessura da base	86
3.2.8.2	Espessura do T	89
3.2.8.3	Comprimento de sobreposição.....	92
3.2.8.4	Raio do T	95
3.2.9	Previsão da energia dissipada	98
3.2.9.1	Espessura da base	98
3.2.9.2	Espessura do T	99
3.2.9.3	Comprimento de sobreposição.....	99
3.2.9.4	Raio do T	100
3.2.10	Análise dos resultados obtidos	101
4	CONCLUSÕES.....	105
5	REFERÊNCIAS.....	109

INTRODUÇÃO

- 1.1 Contextualização
- 1.2 Objetivos
- 1.3 Organização da dissertação

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Atualmente, com o desenvolvimento da tecnologia em setores como a aeronáutica e automóvel, a utilização de adesivos estruturais ganha cada vez mais preponderância como técnica de ligação. Os adesivos estruturais possibilitam ligações de materiais com propriedades distintas entre si. Estas ligações são bastante mais leves comparadas com ligações mecânicas tradicionais. Possibilitam uma distribuição de tensão mais uniforme e são capazes de reduzir significativamente a vibração. Posto isto, estas ligações são bastante usadas em estruturas com forma complexa e que não seriam possíveis de fabricar num só peça. Existem, no entanto, vários fatores que podem influenciar a sua resistência, tais como parâmetros geométricos, materiais a utilizar e as propriedades do próprio adesivo a utilizar na ligação, entre outras.

As juntas de reforço têm um papel bastante importante no projeto de elementos de fuselagem, como por exemplo painéis reforçados. Alterando a geometria é possível obter vantagens na rigidez da estrutura. Por outro lado, vários estudos mostraram que as juntas em estruturas de chapa metálica, como detalhes da carroçaria de um automóvel, contribuem para a perda de rigidez e que as juntas adesivas melhoram o comportamento estrutural do veículo. Existem bastantes configurações de junta de reforço possíveis de aplicar a estruturas de diferentes materiais. No entanto, estas podem apresentar algumas limitações quando solicitadas a esforços de arrancamento. As juntas adesivas solicitadas ao arrancamento têm sido estudadas, mas ainda existem algumas lacunas no que concerne aos efeitos geométricos e materiais e sua influência na resistência da junta. Por outro lado, também é bastante importante existirem ferramentas de projeto que permitam a análise da sua resistência e que permitam verificar se estas são afetadas por diferentes condições materiais e geométricas.

1.2 Objetivos

A dissertação apresentada foi realizada durante o ano letivo de 2019-2020 no âmbito do ramo de Materiais e Tecnologias de Fabrico do Mestrado em Engenharia Mecânica, lecionado no Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP).

Após validação experimental com uma geometria semelhante, o trabalho consistiu na simulação numérica de juntas T em liga de alumínio da série 6000, utilizando três tipos de adesivos distintos (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752) ligados a uma base do mesmo material. Para o estudo numérico recorreu-se ao *software* de elementos finitos ABAQUS® para a realização das simulações pretendidas. As configurações de

junta numéricas incluem quatro variáveis geométricas distintas: a espessura da base (a), a espessura do T (t), o comprimento de sobreposição (l) e o raio do T (r). A espessura de adesivo (t_a) foi considerada constante. Esta dissertação tem como objetivo realizar uma análise numérica detalhada acerca do comportamento dos três tipos de adesivos utilizados nas juntas. Para isso são estudadas a distribuição de tensões, a variável de dano, a resistência e a energia dissipada das diferentes configurações de junta, resultantes dessa mesma análise, usando modelos de dano coesivo para previsão de resistência.

No final será feita uma comparação de resultados numéricos entre os vários adesivos e as várias geometrias para efeitos de projeto de junta. Posto isto, deverá ser possível selecionar o adesivo ideal para aplicações em que as juntas T estejam suscetíveis a solicitações de arrancamento.

1.3 Organização da dissertação

Esta dissertação está dividida e organizada em quatro capítulos.

No primeiro capítulo é apresentada uma abordagem ao tema, aos objetivos propostos e à organização da dissertação.

O segundo capítulo consiste na revisão bibliográfica acerca de matérias relevantes para a realização da dissertação. É feita uma abordagem às ligações adesivas em geral, as indústrias que as utilizam, a sua caracterização, as vantagens e desvantagens do seu uso, as aplicações mais comuns, os esforços a que estão sujeitas e as possíveis configurações de juntas. É também apresentada, de uma forma mais específica, a caracterização de juntas de reforço, as suas aplicações e os tipos de carregamento. Além disso, são apresentados alguns trabalhos experimentais e numéricos realizados em juntas em T e L. Por fim, são descritos os principais métodos de previsão de resistência de juntas adesivas, divididos em modelos analíticos e os métodos numéricos.

No terceiro capítulo é dividido em dois grandes subcapítulos: validação experimental e trabalho numérico. No primeiro subcapítulo é descrita a validação experimental realizada num trabalho anterior e com uma geometria semelhante à utilizada neste trabalho com o objetivo de validar experimentalmente o método numérico, comparando-o com os resultados obtidos em ambiente laboratorial. O segundo subcapítulo consiste no trabalho numérico, baseado em modelos coesivos e usando o *software* ABAQUS®. É apresentada a geometria das juntas e as suas variáveis geométricas, as propriedades dos materiais, condições fronteira, modelos coesivos e as suas leis para a simulação do adesivo. São analisadas as tensões na junta, a variável de dano SDEG, a previsão da resistência e a previsão de energia dissipada. Por fim, é feita uma análise de todos os resultados obtidos.

No quarto capítulo são apresentados os resultados e as conclusões retiradas da realização desta dissertação. São também apresentadas algumas propostas para trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 Ligações adesivas
- 2.2 Juntas adesivas de reforço
- 2.3 Previsão de resistência de juntas adesivas

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ligações adesivas

As ligações adesivas têm vindo a ser amplamente utilizadas para aplicações em que existem problemas relacionados com ligações tradicionais, como é o caso das ligações soldadas, aparafusadas, rebitadas, entre outras (Figura 1). Estas ligações são mais leves comparadas com ligações mecânicas e mostram uma distribuição de tensão mais uniforme quando comparadas com as técnicas tradicionais de ligação [1].

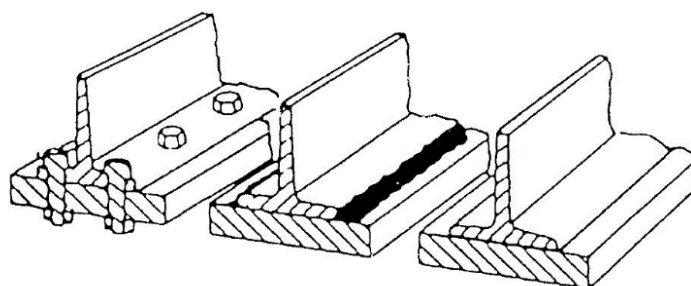


Figura 1 - Ligação aparafusada, soldada e adesiva [2].

Os adesivos, por outro lado, já eram usados há milhares de anos e, na sua grande maioria, eram fabricados à base de produtos naturais, como ossos, peles, peixes, leite e plantas. No início do século XX, foram introduzidos os adesivos com base em polímeros sintéticos, e hoje existem em muitas aplicações industriais. É difícil imaginar um produto, em casa, na indústria, num transporte, que não use adesivos de alguma maneira [3].

O adesivo, numa primeira fase, deve estar na fase líquida de forma a espalhar-se facilmente na superfície e promover o contacto molecular com o substrato. Deve depois solidificar e endurecer, de modo a que a junta suporte as cargas que serão aplicadas à estrutura em serviço. No caso dos adesivos usados em engenharia, o adesivo está, numa primeira fase, sob a forma de um monómero que polimeriza e origina um adesivo polimérico de grande carga molecular. Será sempre necessário entender que a capacidade de suportar essas mesmas cargas e o tempo de vida da junta serão afetados por alguns fatores, como por exemplo, o projeto da junta, a forma como as forças são aplicadas e o meio ambiente a que a junta estará sujeita [4].

É pouco provável encontrar uma distribuição de tensões uniforme numa junta adesiva. O provável seria encontrar uma distribuição não uniforme. As forças aplicadas produzem tensões que podem ser várias vezes a tensão média [4].

O adesivo praticamente distribui as cargas e tensões sobre a área total da união em vez de as centrar apenas em alguns pontos, originando numa distribuição mais uniforme das cargas estáticas e dinâmicas. Desta forma, a ligação com adesivos é mais resistente à flexão e vibração do que, por exemplo, a ligação com rebites [5].

É essencial definir geometrias na execução de uma junta adesiva, de forma a evitar tensões localizadas e de forma a garantir uma boa distribuição de tensões. Um adesivo possui melhor comportamento ao corte (Figura 2) do que ao arrancamento [6].

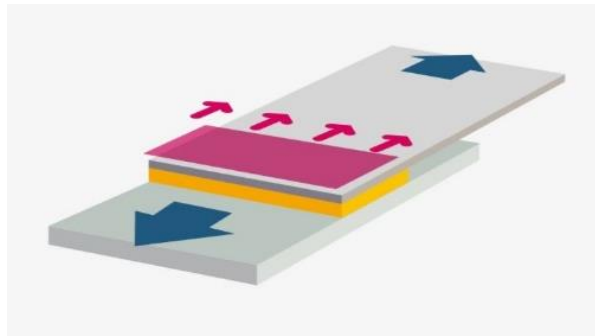


Figura 2 - Distribuição de tensões numa junta adesiva sujeita ao corte [7].

2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

As ligações adesivas apresentam muitas vantagens quando comparadas com os métodos usuais de ligação tais como a soldadura, aparafusagem, rebiteagem e outras ligações mecânicas. Este tipo de ligação, habitualmente designada por colagem, ocupa um papel relevante no domínio dos processos de ligação. As razões que explicam a expansão verificada são várias: facilidade de execução, maiores cadências de produção, menores custos, facilidade em ligar materiais diferentes, melhor resistência à fadiga do que as ligações tradicionais, elevada capacidade de amortecimento de vibrações, entre outras [5]. São também muito usados na ligação de materiais compósitos na aeronáutica (Figura 3).

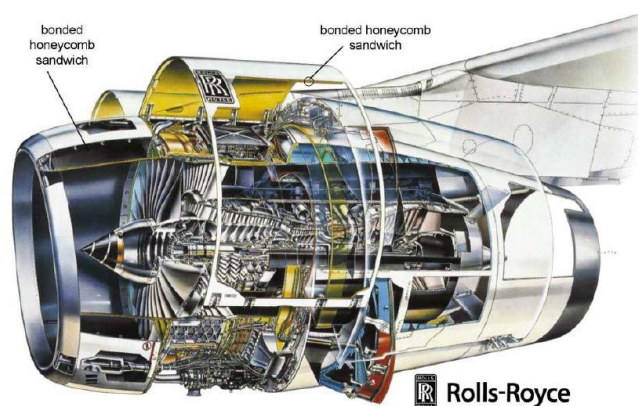


Figura 3 - Vista em corte de um motor de avião usando painéis sandwich colados [8].

Existem inúmeras **vantagens** na utilização de ligações adesivas estruturais. Estas possuem uma distribuição uniforme das tensões ao longo da largura da superfície ligada, o que permite que a ligação possua uma elevada rigidez e transmissão de carga, facilitando assim a redução de peso, que poderá levar a uma redução dos custos.

A distribuição de tensões é mais uniforme numa junta adesiva quando comparada com uma ligação rebitada, por exemplo (Figura 4), que possui uma elevada concentração de tensões e consequentemente uma menor resistência à fadiga.

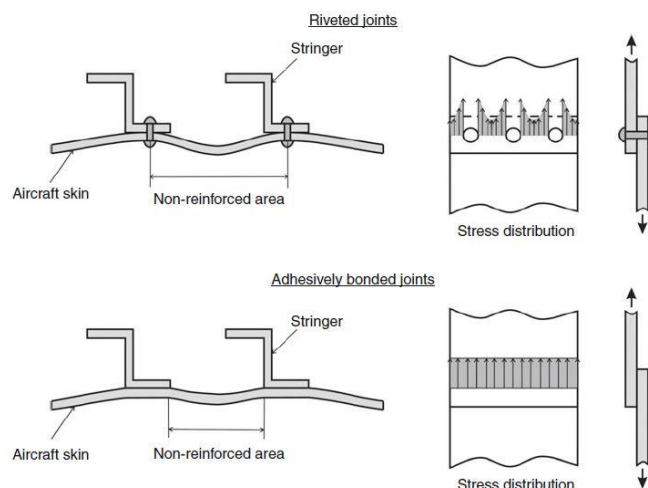


Figura 4 - Distribuição de tensões em ligações rebitadas e em ligações adesivas [3].

O amortecimento de vibrações nestas ligações permite que as tensões presentes sejam parcialmente absorvidas, melhorando assim a resistência à fadiga dos próprios componentes ligados.

Este tipo de ligação também permite ligar diferentes tipos de materiais, com diferentes coeficientes de expansão e, por outro lado, permite a ligação de chapas com eficiência, o que pode constituir uma aplicação importante na ligação de materiais metálicos ou não metálicos.

A ligação adesiva é o método mais vantajoso de ligar dois materiais, uma vez que pode ser automatizado, o que torna o projeto mais flexível e permite o uso de novos conceitos e materiais. Por outro lado, permitem ter estruturas com contornos regulares porque evitam furos (rebites, parafusos) e marcas devidas à soldadura. A ligação adesiva é também capaz de criar um contacto contínuo entre as superfícies ligadas [4].

Existem, contudo, algumas **desvantagens** das ligações adesivas estruturais. Estas ligações que necessitam de um projeto de ligação que suprima ao máximo as forças de arrancamento, clivagem e impacto. Um exemplo é quando um dos dois materiais não é muito rígido. Neste caso, a ligação pode estar sujeita a forças de arrancamento em quando os dois materiais são rígidos, a ligação pode estar sujeita a forças de clivagem.

É fundamental usar geometrias que evitem tensões localizadas e que garantam uma distribuição o mais uniforme possível de tensões. A melhor solução é sempre projetar uma ligação em que o adesivo esteja maioritariamente sujeito a tensões de corte. Neste caso, as tensões são paralelas à ligação adesiva e estão melhor distribuídas.

Outra desvantagem neste tipo de ligações é o facto de possuírem uma limitada resistência a condições extremas, tais como o calor e humidade devido à natureza polimérica do adesivo. Para se obter bons resultados é necessária uma cuidada preparação das superfícies através de, por exemplo, abrasão mecânica, desgorduramento com solvente, ataques químicos, primários, entre outros métodos.

Por outro lado, o controlo de qualidade e segurança são mais difíceis, embora tenham sido desenvolvidas recentemente técnicas não destrutivas adequadas [4].

Um **processo de ligação** de juntas adesivas estruturais passa por 5 etapas: a seleção do adesivo, o projeto da junta, a preparação da superfície, o fabrico da junta e por fim, o controlo do processo.

A **seleção do adesivo** deve cumprir um conjunto de normas definidas pela aplicação em vista. Geralmente os parâmetros mais relevantes são a resistência mecânica, ductilidade, temperatura de serviço, o meio ambiente e o método de aplicação.

Um adesivo estrutural é um adesivo que resiste a elevadas forças e que é responsável pela resistência e rigidez da estrutura. Esta família de adesivos permite uma resistência ao corte de aproximadamente 7 MPa [4]. A sua seleção inicia com um estudo genérico sobre os materiais a ligar. Uma regra geral é selecionar um adesivo que preencha completamente a área a ligar do substrato, e a energia superficial do adesivo deverá ser inferior à energia superficial desse mesmo substrato.

Numa ligação ideal, o substrato deverá ser o material a ceder. No entanto na maior parte das ligações que são executadas adequadamente, o adesivo será o ponto mais fraco porque as forças de adesão são mais fortes do que as forças de coesão que atuam no interior do adesivo. A tensão de cedência dos substratos também poderá condicionar a rotura do adesivo, uma vez que a deformação plástica dos substratos provoca uma grande concentração de tensões nas extremidades da junta, podendo mesmo levar à rotura prematura do adesivo [4].

Depois da seleção apropriada do adesivo, o próximo passo será o **projeto da junta**. Um dos fatores a ter em conta é a facilidade com que o substrato pode ser fabricado. Existem geometrias de junta que podem favorecer o projeto da junta, como por exemplo t_a , que deverá estar compreendida entre os 0,1 e 0,5 mm, o comprimento de sobreposição (Figura 5), a existência de filete no adesivo e a geometria dos substratos. Por outro lado, o tipo de substrato, o custo associado à fabricação e à montagem da junta também deverão ser tidos em conta [4].

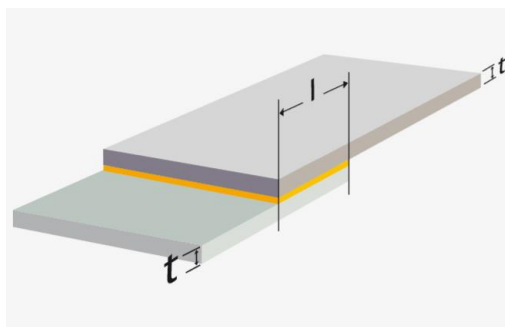


Figura 5 - Comprimento de sobreposição (l) numa junta de sobreposição simples [7].

Existe também um fator muito importante que o projetista terá de considerar, que é o tipo de carregamento a junta estará sujeita. O projeto deverá sempre garantir que as forças de arrancamento e de clivagem são reduzidas ao máximo através de um correto dimensionamento. Será necessário também recorrer a métodos de dimensionamento que tenham em consideração a resistência mecânica estática e, eventualmente, a resistência à fadiga e à fluência.

O ambiente em que a junta irá operar deverá também ser analisado, ou seja, fatores como o intervalo de temperatura, humidade e resistência química podem, se não estiverem dentro dos intervalos normais de utilização, podem levar a uma rotura prematura da junta [4].

As propriedades mecânicas do adesivo, como o módulo de elasticidade e ductilidade, são também muito importantes no projeto da junta. Os adesivos com maior tenacidade e mais flexíveis têm, na sua generalidade, uma menor resistência mecânica. Por outro lado, a tensão média de rotura numa junta com este tipo de adesivos é normalmente superior. O módulo de elasticidade de um adesivo tem efeitos na distribuição das tensões ao longo do adesivo. Quanto maior a rigidez do adesivo, menos uniforme é a distribuição de tensões ao longo deste, o que pode diminuir a resistência da junta, especialmente no caso de adesivos frágeis. Estes adesivos também apresentam menor resistência quando comparados com adesivos dúcteis (Figura 6).

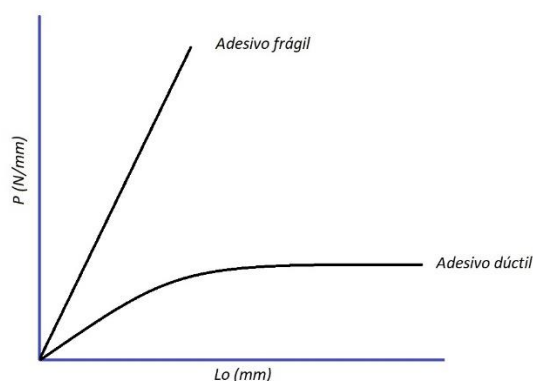


Figura 6 - Comparação da resistência entre adesivo dúctil e frágil (elaboração própria).

Genericamente, os adesivos com ductilidade elevada têm uma resistência mecânica inferior, mas a ductilidade dos adesivos é favorável para a resistência de uma junta adesiva porque os adesivos mais dúcteis são menos sensíveis à propagação de fendas do que os adesivos frágeis. De facto, os adesivos dúcteis permitem uma redistribuição das tensões na camada de adesivo quando a sua tensão limite é atingida, ao invés de ocorrer a rotura imediata do adesivo, o que origina uma resistência da junta superior [4]. Na Figura 7 estão representadas duas possíveis configurações de juntas adesivas para aplicações distintas.

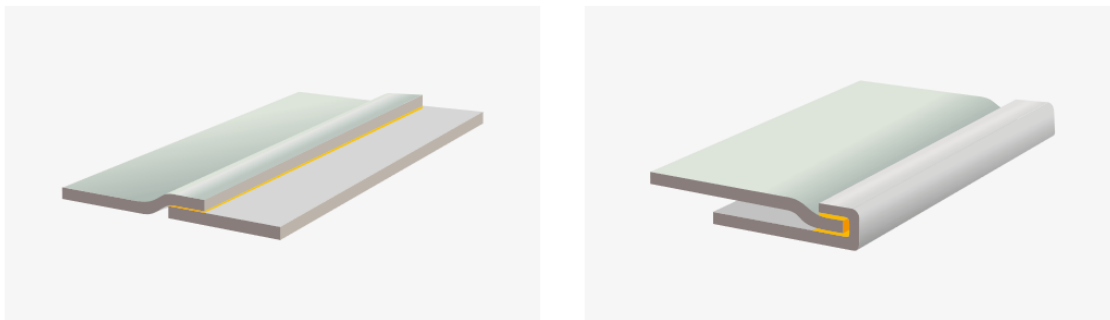


Figura 7 - Duas possíveis configurações de juntas adesivas [7].

A **preparação da superfície** tem como principal objetivo garantir que a adesão seja máxima, e que o ponto mais fraco da junta seja ou o adesivo ou o substrato. Com uma boa preparação da superfície, a rotura não deve ocorrer na interface devido a uma camada fraca ou molhagem insuficiente. Todos os substratos devem ser tratados de qualquer forma antes da colagem. Isso pode passar por um ou uma combinação dos seguintes efeitos:

- Remoção de material;
- Modificação química da superfície;
- Alteração da topografia da superfície.

Na remoção de material, os óleos, gorduras, camadas de óxidos pouco resistentes, pó, contaminantes e agentes de desmoldagem devem ser removidos da superfície. A eliminação destas substâncias deverá ser eficaz de forma a obter uma superfície o mais limpa possível. Essa limpeza é ainda mais importante se a sujidade presente na junta for gordurosa porque a sua fraca energia de superfície pode originar problemas na molhagem do adesivo. Na modificação química da superfície, e no caso do alumínio, uma modificação química da superfície significa substituir o óxido presente por outro mais firmemente ligado ao metal de base e mais resistente. A alteração da topografia da superfície, ou encravamento mecânico, pode ser utilizado com o intuito de criar uma superfície mais rugosa e capilar. A preparação da superfície é uma etapa bastante importante no processo de ligação adesiva. Os tratamentos superficiais têm como objetivo a formação de superfícies resistentes e fáceis de molhar. A resistência de uma junta adesiva aumenta consideravelmente quando todos os contaminantes são

removidos da superfície. Na Tabela 1 é possível analisar o efeito de preparações de superfície de juntas adesivas em substratos de alumínio com dois tipos de adesivos distintos [4].

Tabela 1 - Efeito da preparação superficial na resistência de juntas adesivas [4].

Substrato	Tratamento	Adesivo	Resistência ao corte (MPa)
Alumínio	Sem tratamento	Epóxido	3,1
	Desengorduramento em vapor		5,8
	Grenalhagem		12,1
	Ataque químico		19,0
	Sem tratamento	Vinilo-fenólico	16,9
	Desengorduramento		18,9
	Ataque químico		35,7

O **fabrico da junta** implica a aplicação do adesivo sobre os substratos a colar e a cura do adesivo sob determinadas condições de temperatura e pressão. Como o adesivo é aplicado no estado líquido, é necessário garantir que os substratos a ligar estão bem fixos durante a cura.

Finalmente, para garantir que a junta fabricada tem uma resistência satisfatória a curto e longo prazo, as juntas devem ser sujeitas a um **controle do processo** através de ensaios não destrutivos [4].

2.1.2 Aplicações comuns das juntas adesivas

A indústria aeronáutica tem desenvolvido estas ligações e, atualmente, a sua aplicação é cada vez mais comum e diversificada (Figura 8).

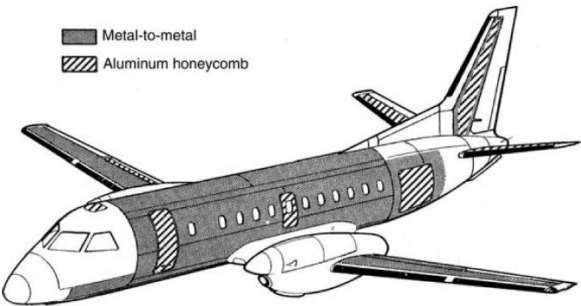


Figura 8 - Aplicações de juntas adesivas no avião SAAB 340 - fuselagem, asas e cauda [3].

No caso da indústria automóvel, a preocupação com a redução de peso, baixos consumos e aumento da velocidade originou a procura de matérias primas mais leves, como os plásticos ou os alumínio. Estes materiais são por norma difíceis de ligar por processos tradicionais de ligação e é principalmente por este motivo que os adesivos se estão a impor como método elegido para a ligação [4].

Existe uma enorme variedade de adesivos que são possíveis de encontrar na fabricação de aeronaves na indústria aeronáutica (Figura 9) [9]. Estes adesivos são vistos como substitutos de parafusos, rebites, abraçadeiras e outras formas de fixação. Quando usados em aplicações de ligação estrutural, estes adesivos funcionam como componentes integrais no conjunto e não como elementos separados. Estruturas adesivas são geralmente mais leves, mais baratas e mais fáceis de montar do que as ligadas por métodos mecânicos. As tensões são também mais uniformemente distribuídas e são bastante mais flexíveis. É um recurso altamente desejável em algumas aplicações que envolvem elevadas forças mecânicas ou quando é necessário amortecimento [10].

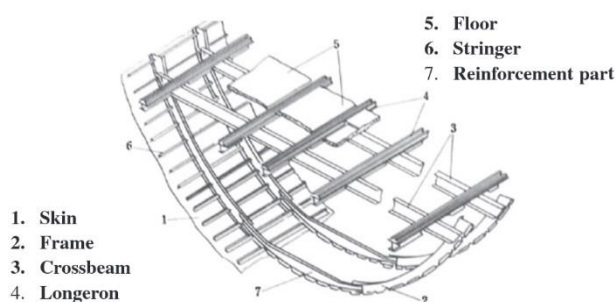


Figura 9 - Esquema da fuselagem traseira de um avião [9].

Este tipo de ligações também é bastante usado na indústria automóvel, onde a redução de peso, e consequentemente a redução de consumo de combustível, torna este tipo de ligações bastante estudadas e utilizadas. Os projetistas de veículos rodoviários têm vindo a desenvolver componentes mais leves e baratos, e para isso é necessário prever e desenvolver formas de união desses mesmos componentes. O principal método de união no setor automóvel é através de soldadura por pontos. Este método exigiu grande investimento em tecnologia apropriada, como linhas de produção altamente automatizadas e longos anos de experiência em design. No entanto, existem desvantagens na soldadura por pontos, porque este método exige acesso aos dois lados da junta, não é capaz de unir materiais compósitos ou diferentes materiais e geralmente destrói quaisquer revestimentos usados para melhorar a resistência à corrosão.

Um método bom e pouco dispendioso que pode resolver os problemas acima descritos é, portanto, a ligação adesiva. Para usar estes adesivos, eles devem cumprir requisitos de desempenho. O problema fundamental com o uso de adesivos foi superado com a aplicação a alta velocidade de adesivos utilizando robôs de alta tecnologia em linhas de

produção [11] (Figura 10) e o desenvolvimento de adesivos dúcteis que podem suportar melhor o impacto [12].

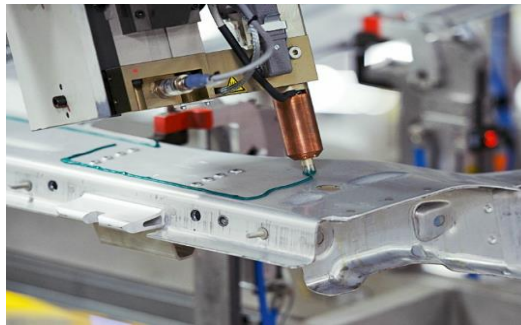


Figura 10 - Exemplo de aplicação de adesivo com auxílio de robôs [11].

2.1.3 Esforços e modos de rotura em juntas adesivas

É difícil encontrar uma distribuição de tensões uniforme numa junta adesiva. É então normal encontrar uma distribuição não uniforme. As forças aplicadas produzem tensões que podem ser várias vezes a tensão média. Estas concentrações de tensão são muitas vezes imprevisíveis e podem determinar a máxima resistência da junta. É da responsabilidade do projetista diminuir estes gradientes através de um projeto adequado. Contudo, convém antes identificar os vários modos de carregamento. Existem essencialmente cinco modos fundamentais de carregamento: tração, compressão, corte, clivagem e arrancamento (Figura 11).

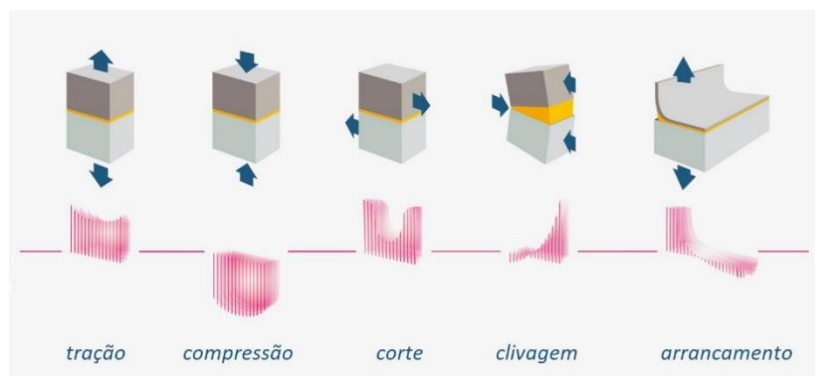


Figura 11 - Cinco modos fundamentais de carregamento em ligações adesivas [7].

Os esforços de **tração** desenvolvem quando forças atuando perpendicularmente ao plano da junta são distribuídas uniformemente ao longo da área adesiva. Deve-se projetar a junta de modo a ter as superfícies dos substratos paralelos e forças normais. Na prática, é difícil de garantir o valor correto de t_a e as forças raramente são só axiais, o que origina tensões inadequadas de clivagem ou de arrancamento. As juntas que trabalharem sob tração devem ser projetadas com guias para garantir um carregamento axial uniforme. Os substratos também devem ser suficientemente rígidos para garantir que a tensão fique uniformemente distribuída.

Tal como os esforços de tração, os esforços de **compressão** devem manter-se alinhados de modo a que o adesivo permaneça em compressão pura.

As tensões de **corte** aparecem quando as forças que atuam no mesmo plano do adesivo tendem a separar os substratos. As juntas são geralmente mais resistentes quando solicitadas ao corte, porque toda a área colada contribui e é relativamente fácil manter os substratos alinhados.

Os esforços de **clivagem** e **arrancamento** devem ser evitados em juntas adesivas. A clivagem é definida como o esforço que ocorre quando as forças na extremidade de uma junta rígida atuam de modo a separar os substratos. Os esforços de arrancamento são idênticos aos de clivagem, mas aplicam-se ao quando um ou ambos os substratos são flexíveis. O ângulo de separação pode ser muito maior para o arrancamento do que para a clivagem. As juntas sob clivagem ou arrancamento são muito menos resistentes do que aquelas sujeitas a corte, porque as tensões estão concentradas numa área reduzida. Toda a tensão fica localizada na extremidade da junta. O adesivo que está na outra extremidade pouco contribui para a resistência da junta.

O objetivo de uma ligação eficiente é a transferência de carga entre os dois componentes ligados, mantendo a sua integridade estrutural sob solicitações estáticas e ou dinâmicas e condições ambientais (humidade e temperatura) adversas. Torna-se assim fundamental a correta avaliação da distribuição do perfil de tensões e, consequentemente, dos **modos de rotura** induzidos nas juntas adesivas (Figura 12). De um modo geral, podem-se distinguir três modos de rotura diferentes em juntas adesivas, **rotura coesiva** no interior do adesivo, **rotura adesiva** na interface entre o substrato e o adesivo e **rotura de um dos substratos**. A rotura coesiva ocorre quando os substratos e a ligação entre o adesivo e o substrato são mais resistentes do que o próprio adesivo. Por vezes a rotura ocorre por uma combinação dos referidos modos, designando-se nesse caso por **rotura mista**.

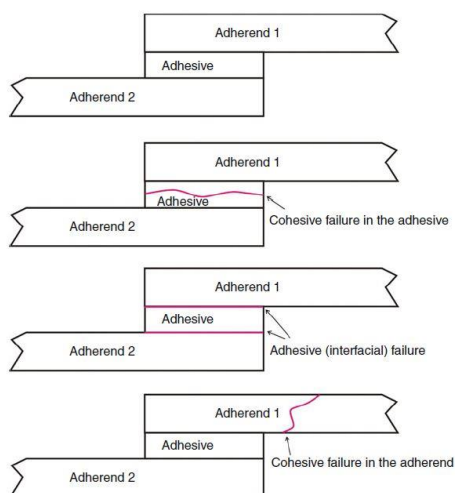


Figura 12 – Tipos de roturas em juntas adesivas [3].

É geralmente aceite que a rotura adesiva se deve a uma má preparação das superfícies. Por outro lado, assume-se que a junta deve ser projetada de modo a que a rotura nunca ocorra pelo adesivo. Daqui se depreende que uma junta corretamente projetada e concebida será aquela onde ocorra rotura do substrato [4].

2.1.4 Configurações possíveis de junta

A junta adesiva ideal é aquela que em situações de carregamento, mais resiste à rotura. Esses esforços podem ser previstos conforme a geometria da junta. Algumas configurações de juntas podem ser caras ou difíceis de fabricar. O projetista é confrontado com estes fatores durante o dimensionamento [9]. Existem várias configurações possíveis de juntas (Figura 13).

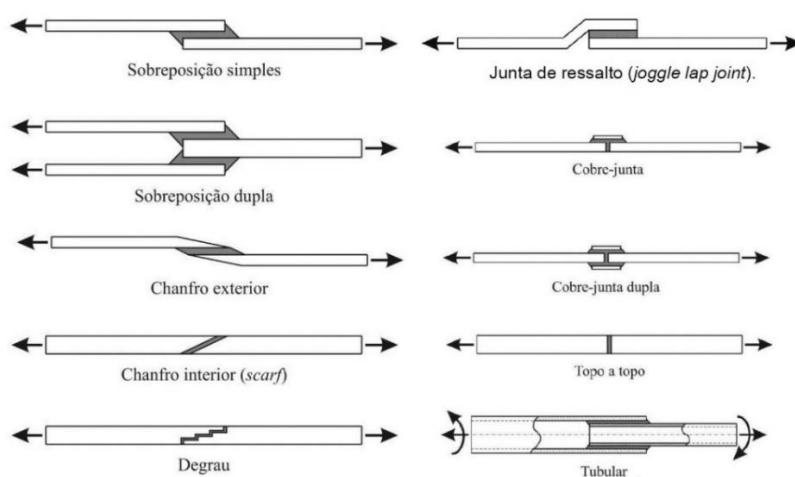


Figura 13 - Diferentes geometrias de juntas [4].

A **junta de sobreposição** simples é bastante utilizada devido à sua facilidade de fabricação, por ser aplicável a substratos finos e pelo adesivo estar sujeito maioritariamente a tensões de corte. No entanto, este tipo de junta provoca desalinhamento nos substratos, o que provoca tensões de arrancamento nas extremidades da junta [2].

Para diminuir esse desalinhamento, é possível utilizar juntas com um substrato dobrado para alinhar as forças, neste caso denominadas por **juntas de ressalto**. Este tipo de junta pode ser facilmente obtido, dobrando os substratos.

Por outro lado, a **junta de chanfro** também é bastante eficiente. Possui boa distribuição de tensões ao longo do comprimento de sobreposição [2]. Neste tipo de junta a resistência da ligação depende sempre do ângulo do chanfro na zona da sobreposição, e assim, quanto maior for o ângulo, maior será a resistência.

A **junta de sobreposição dupla** é mais difícil de fabricar devido à sua geometria relativamente à junta de sobreposição simples, contudo a flexão presente na junta é

bastante reduzida. Assim, é possível obter uma resistência de junta superior comparada com uma junta de sobreposição simples com as mesmas dimensões [13].

A **junta de topo a topo** é também de fácil fabricação. No entanto, este tipo de junta poderá estar sujeito à flexão devido ao desalinhamento dos substratos, o que faz com que a junta esteja sujeita a clivagem [2]. Devido à pequena área de colagem, este tipo de junta também não apresenta uma resistência elevada à tração. É possível, no entanto, reduzir este efeito utilizando juntas macho-fêmea, por exemplo. Existem outras formas geométricas que permitem melhorar este tipo de junta. No entanto, existe por vezes a necessidade de recorrer a processos de maquinagem.

A **junta tubular** apresenta uma boa resistência a esforços elevados de tração e compressão, mas também pode sofrer esforços de arrancamento em caso de desalinhamento relativamente ao eixo de revolução. Normalmente são usados chanfros e canais com auxílio de maquinagem, aumentando assim a área de contacto e a resistência ao arrancamento.

As juntas do tipo **cobre-junta** e **cobre-junta dupla** são normalmente utilizadas no restauro de estruturas danificadas. O processo de reparação dá-se pela adição de zonas alternativas de transferência de esforços, colocando um ou dois remendos adesivos na zona da danificada [14].

2.2 Juntas adesivas de reforço

As cargas aplicadas em juntas adesivas entre substratos finos e substratos com maior espessura podem por vezes gerar esforços indesejáveis de arrancamento. Existem algumas geometrias que podem levar à diminuição destes esforços. Uma aplicação comum de juntas adesivas de reforço é a ligação de reforços sobre substratos finos com o objetivo de aumentar a sua rigidez mas, nestes casos, estas juntas quando solicitadas à flexão podem induzir clivagem no adesivo. Existem algumas soluções que permitem diminuir essa mesma clivagem (Figura 14) e melhorar a resistência a esforços de flexão aumentando a área colada, a flexibilidade do rebordo e a rigidez da base [4].

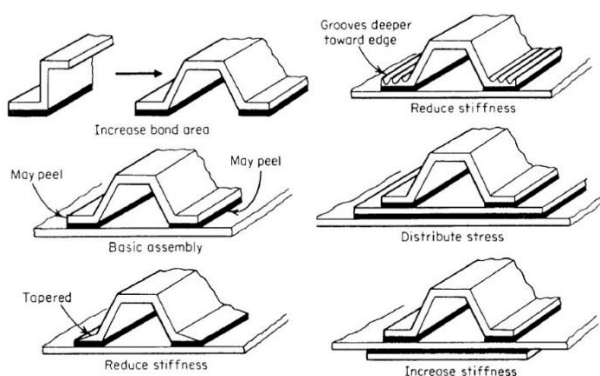


Figura 14 - Soluções para a diminuição de clivagem em juntas de reforço [2].

Uma junta de topo é o método mais simples de unir duas superfícies. Embora a junta apresente uma boa resistência à tensão e à compressão, quando sujeita a esforços de flexão, apresenta resultados bastante insatisfatórios.

Por outro lado, as juntas em L e T (Figura 15) oferecem resultados bastante satisfatórios. A geometria da junta em T é preferível devido à sua grande área de ligação e boa resistência em todas as direções [2].

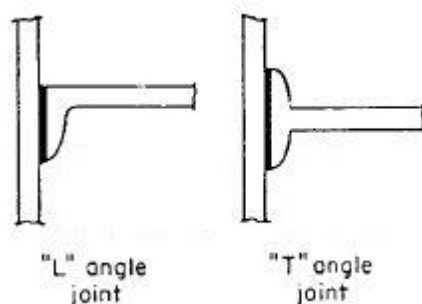


Figura 15 - Junta em L e T [2].

As juntas em T são caracterizadas pela orientação perpendicular dos dois substratos. Porém, também se inclui nesta denominação juntas cujos substratos a colar apresentem uma orientação diferente de 90°. O estudo deste tipo de juntas é mais complicado relativamente às juntas de sobreposição ou às juntas tubulares. O objetivo principal desta junta é a minimização das forças de arrancamento e a maximização das solicitações de corte no adesivo. Alguns resultados demonstram que uma base mais resistente contribui para o decréscimo das forças de arrancamento no adesivo e permite aumentar a força de rotura. As juntas de canto são semelhantes às juntas em T [4].

2.2.1 Aplicações

As ligações adesivas têm cada vez mais um papel importante nas mais variadas indústrias. É conhecida a sua importância no aumento significativo da rigidez de carroçarias na indústria automóvel, por exemplo. As juntas adesivas de reforço em constante desenvolvimento em paralelo com o desenvolvimento de novos materiais compósitos. Estas ligações são amplamente aplicadas em áreas em que a segurança da ligação é de grande importância, em setores como o aeroespacial, aeronáutico (Figura 16) e automotivo. Como tal, as ligações adesivas utilizadas para fins estruturais dependem de vários parâmetros, como as condições de carregamento, configurações de junta, adesivo e substrato, condições ambientais, entre outros. Por este motivo, existem vários estudos que se focam em compreender e mitigar todos estes parâmetros [15].

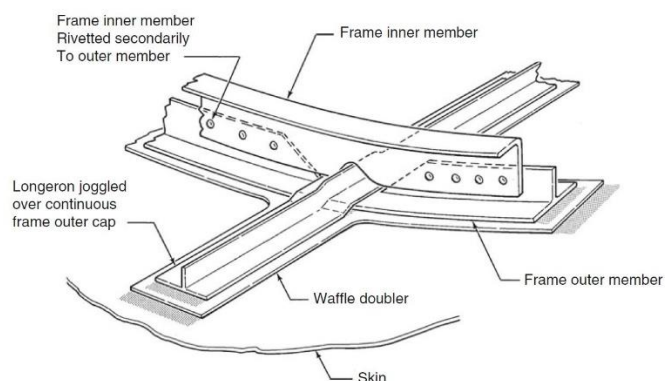


Figura 16 - Juntas adesivas de reforço em avião [3].

No passado, vários estudos mostraram que as juntas em estruturas de chapa metálica, como detalhes da carroçaria, contribuem para a perda de rigidez e que as juntas adesivas melhoram o comportamento estrutural de um veículo [16, 17].

Beevers et al. [18], analisaram a rigidez de ligações adesivas aplicadas em carroçarias de automóveis (Figura 17) pelo método de elementos finitos (MEF) e por ensaios experimentais e foi observado um aumento de cerca de 30% na rigidez da carroçaria ligada por adesivos comparada com carroçarias obtidas através de soldadura por pontos.

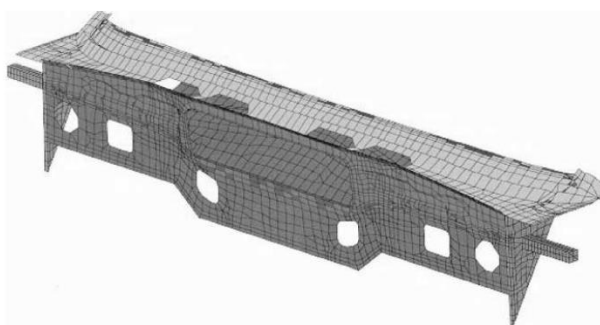


Figura 17 - Elemento da carroçaria de um automóvel [18].

Na indústria aeronáutica, as juntas de reforço têm um papel bastante importante no projeto de elementos de fuselagem, como por exemplo painéis reforçados. Hemanth et al. [19] estudaram painéis em grelha reforçada (GSS – *Grid Stiffened Structures*), alterando a geometria para entender os benefícios que essa alteração poderia apresentar na rigidez da estrutura (Figura 18).

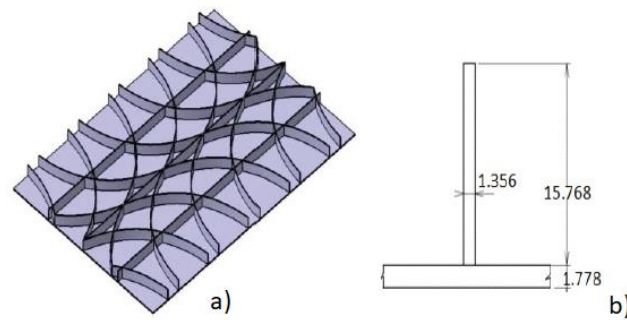


Figura 18 - a) painel GSS com reforços curvos, b) perfil do painel (mm) [19].

Tradicionalmente estas estruturas eram executadas com reforços alinhados de forma reta devido à facilidade de construção/fabricação. Nos últimos anos, essa geometria tem sido alterada e o estudo teve como objetivo demonstrar que estruturas com reforços curvos apresentavam melhorias significativas na rigidez. Através do auxílio do MEF, foram analisadas três geometrias com curvaturas diferentes (Figura 19), o que permitiu concluir que um dos painéis (20°) teve um aumento de rigidez entre 3 e 12%.

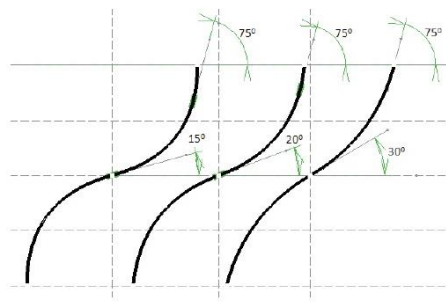


Figura 19 - Geometrias consideradas no estudo [19].

2.2.2 Tipos de carregamento

No trabalho de Li et al [20] foram estudadas as distribuições de tensões numa ligação adesiva de um substrato em forma de L a uma superfície rígida (Figura 20), usando o MEF.

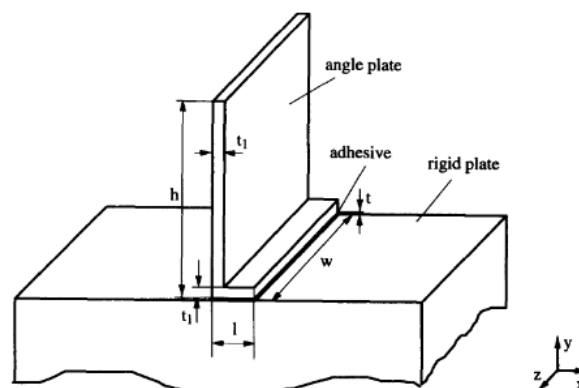


Figura 20 – Junta em L [20].

A junta em L foi estudada segundo três diferentes carregamentos (Figura 21), dois à flexão e um de arrancamento com a mesma força aplicada – 100 N.

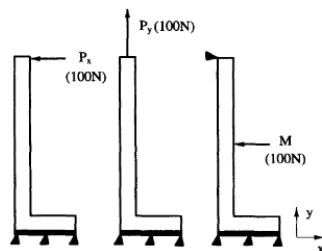


Figura 21 – Junta em L sujeita a três carregamentos (P_x , P_y e M) e condições fronteiriça [20].

A distribuição de tensões normais para os três carregamentos permitiu determinar o carregamento P como mais desfavorável, apresentando tensões muito superiores quando comparadas com as restantes, com maior incidência na curva interior do substrato em L e na extremidade mais adjacente da camada adesiva. Foi também possível verificar elevados gradientes de tensão normal (Figura 22). Este carregamento apresenta ainda valores elevados de tensões de corte, enquanto nos restantes os valores de tensão de corte são mínimos. No carregamento P_y o valor máximo de tensão normal ocorre na extremidade esquerda da camada adesiva, sendo o substrato sujeito também a elevadas tensões. Em relação à carga de flexão M , esta apresenta distribuições de tensão idêntico às do carregamento P_x , embora com grandeza de tensões inferior.

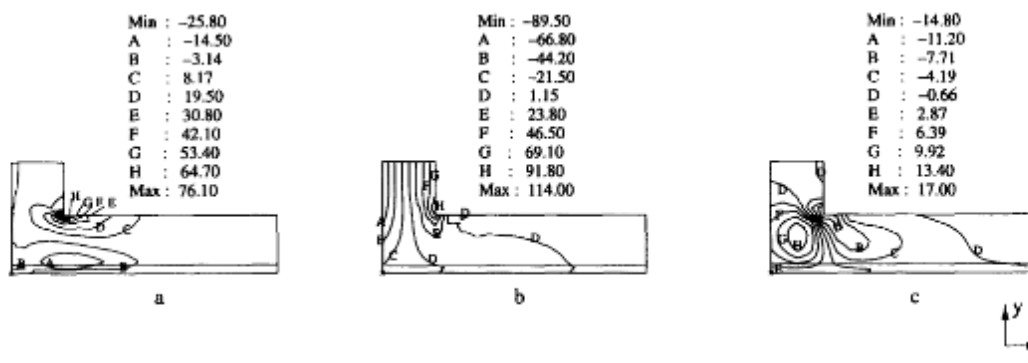


Figura 22 - Tensões normais para os três carregamentos a) P_x b) P_y e c) M [20].

Neste estudo foram também consideradas diferentes espessuras de camada adesiva, substratos em L, e valores de L_0 . Foi possível concluir que, para um carregamento P_x , as tensões normais máximas aumentam com o decréscimo de t_A . Para um carregamento P_y , os valores de tensões normais são bastante mais pequenos do que com carregamentos P_x . Finalmente para M , foi possível concluir que os valores de tensões normais são visivelmente inferiores aos demonstrados para P_x mas com distribuição de tensões idêntico ao longo do seu comprimento.

Através deste estudo, utilizando diferentes espessuras de substrato em L e valores de L_0 , os autores obtiveram as mesmas conclusões em comparação com o primeiro estudo

onde utilizaram diferentes espessuras de adesivo. Verificaram-se valores superiores de tensão, em ambos os estudos com o carregamento P_x , bem como valores superiores de tensão com a diminuição da espessura de substrato e de L_0 . Os resultados numéricos estiveram de acordo com os resultados obtidos experimentalmente.

2.2.3 Trabalhos experimentais

O trabalho de Aydin et al [15] consistiu no estudo experimental e numérico de duas geometrias diferentes de juntas T (Figura 23) solicitadas à tração, usando o mesmo adesivo (FM73) e o mesmo material para os substratos (AA2024-T3).

Na geometria tipo-I, os dois substratos estão ligados através de um filme de 0,1 mm de adesivo com dois suportes em L. Na geometria tipo-II, os 2 substratos foram sujeitos a uma maquinagem que fez com que os dois suportes L encaixassem perfeitamente nos substratos ligados também com um filme de 0,1 mm de adesivo.

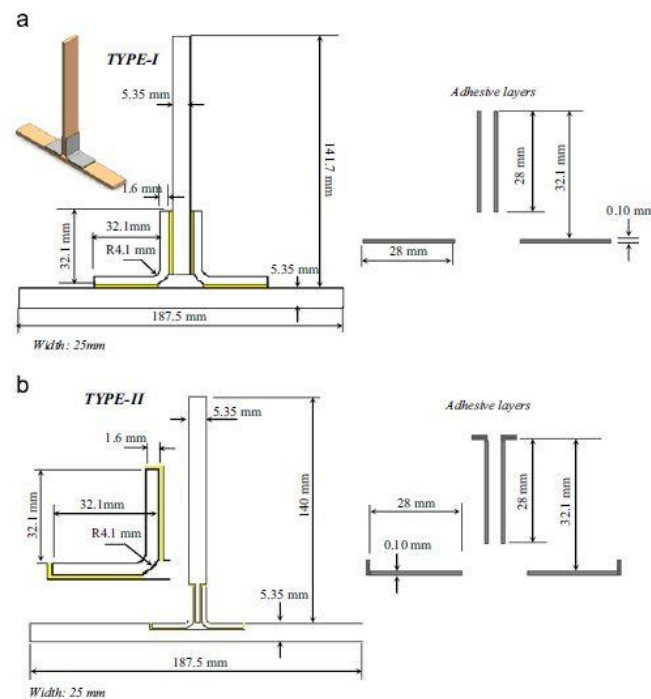


Figura 23 - Dois tipos de geometrias T - a) Tipo-I, b) Tipo-II [15].

Em todas as amostras a fenda iniciou-se nos suportes, nomeadamente na interface entre o raio exterior e o substrato de alumínio horizontal. Quando propagada a um comprimento crítico, a rotura ocorreu repentinamente. Para todas as amostras, nenhuma fenda foi detetada na camada adesiva na interface entre o substrato vertical e os suportes. Foram observadas roturas coesivas em todas as amostras testadas.

Todas as amostras foram executadas com o mesmo comprimento de sobreposição (Figura 24), e as juntas tipo-II aguentaram mais 27% de carga do que as do tipo-I, embora a sua rigidez à flexão tenha diminuído.

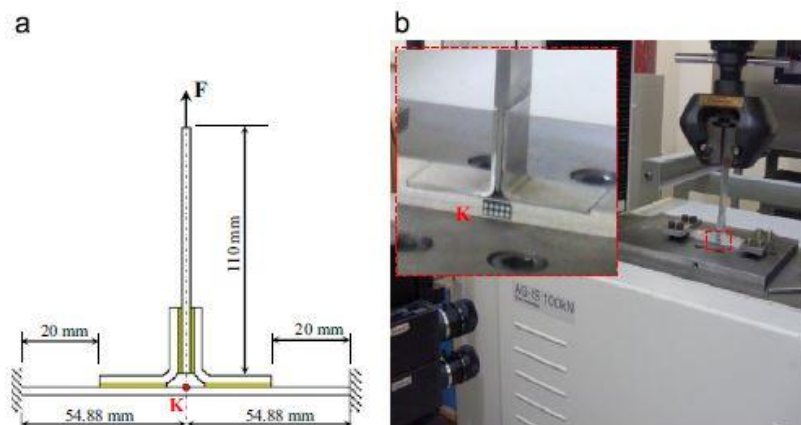


Figura 24 - a) Condições fronteira e ponto de carga aplicada, b) montagem das amostras [15].

Foi concluído que houve um aumento nos valores absolutos das tensões de corte, τ_{xy} , nas amostras do tipo-II em comparação com as amostras do tipo-I.

Xiaohong et al. [21] estudaram o comportamento mecânico de cinco configurações diferentes de juntas em T (Figura 25). Para este estudo foram usados substratos em liga de alumínio e lítio (2060-T) e adesivo de dois componentes (Hysol EA 9394). As propriedades mecânicas do adesivo e do substrato são apresentadas na Tabela 2. O tempo de cura foi de uma hora a 66°C.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas da liga 2060-T e do adesivo EA9394 [21].

Material	Módulo de Elasticidade E (GPa)	Tensão Máxima σ (MPa)	Alongamento δ (%)	Coefficiente de Poisson ν
2060-T	79,7	532	12,5	0,2
EA9394	4,2	46	1,66	0,42

A geometria do substrato horizontal foi de 100 mm de comprimento, 25 mm de largura e 2 mm de espessura e a geometria do substrato vertical foi de 30 mm de comprimento, 25 mm de largura e 2 mm de espessura. O valor de t_a foi 0,2 mm em todas as juntas.

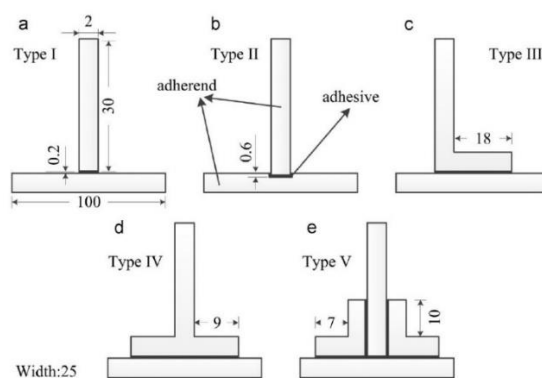


Figura 25 - Os cinco tipos de juntas T utilizadas (mm) [21].

O estudo experimental foi executado numa máquina de ensaios de tração à temperatura ambiente com uma velocidade de 1 mm/min. Todas as curvas força-deslocamento (Figura 26), forças de rotura e áreas médias de colagem foram registadas (Figura 27).

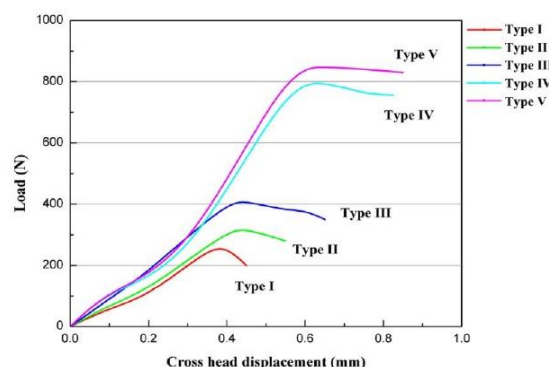


Figura 26 - Curvas força-deslocamento para os cinco tipos de juntas [21].

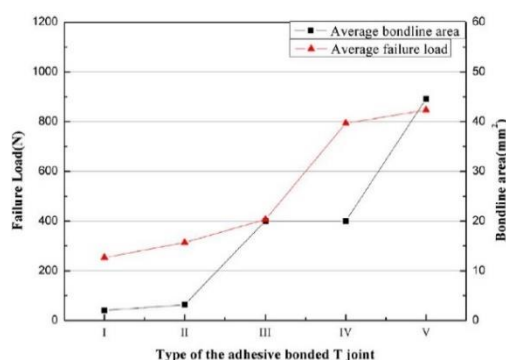


Figura 27 - Média das forças de rotura e áreas médias de colagem [21].

Após os ensaios em todas as amostras, foram analisadas todas as morfologias das superfícies para cada tipo de junta T (Figura 28). Foi verificado que, com o aumento da área adesiva da junta, aumentou a carga média de rotura. Foi também verificado que a junta tipo-II suportou mais 24% de carga comparando com a junta tipo-I, devido ao encaixe dos substratos antes de serem ligados embora houvesse uma diminuição de rigidez da junta.

A área média da ligação das juntas tipo-III é a mesma das juntas tipo-IV, mas verificou-se que a carga média de rotura das juntas tipo-IV é quase o dobro comparando com as juntas tipo-III. Concluiu-se que a assimetria das juntas do tipo-III reduziu a capacidade de carga.

Verificou-se também que as juntas do tipo V aguentaram cargas superiores às juntas do tipo IV, uma vez que a área a ligada das juntas do tipo V era 123% maior do que a do tipo IV. Concluiu-se então que a área de colagem localizada verticalmente não leva a um aumento da capacidade de carga, tanto quanto a área de colagem localizada horizontalmente.

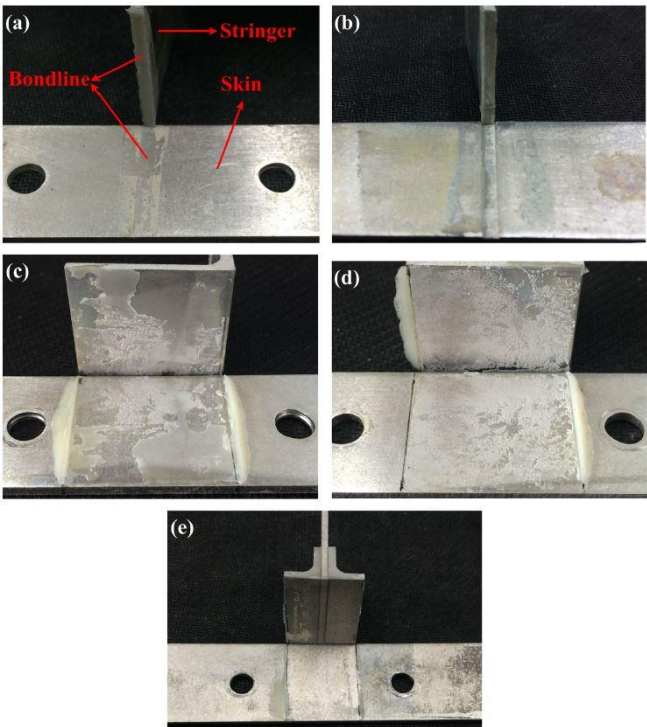


Figura 28 - Morfologia das cinco superfícies após falha da ligação [21].

2.2.4 Trabalhos numéricos

Zhang et al. [22] estudaram o comportamento de uma junta com geometria em L (liga de alumínio LY 2024) sujeita à tração (Figura 29). Essa junta foi ligada com adesivo de dois componentes (J-135) a um substrato compósito em polímero reforçado com fibras de carbono (CFRP).

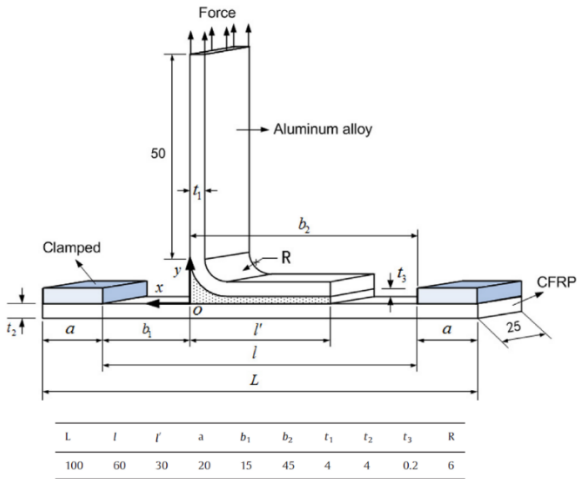


Figura 29 – Configuração e dimensões (mm) da junta L sujeita a tensões de arrancamento [22].

As propriedades mecânicas dos materiais utilizados estão representadas na Tabela 3. No trabalho experimental foi aplicada uma força vertical na extremidade da junta L e o substrato em compósito foi fixo a uma ferramenta. A amostra sofreu uma tensão de

arrancamento na base onde foi feita a junta adesiva. Foi usada uma máquina de ensaios de tração INSTRON Fasttrack 8801.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas dos materiais utilizados [22].

Material	Módulo de elasticidade E (GPa)	Coefficiente de Poisson	Módulo de corte G (GPa)	Tensão de cedência (MPa)
LY-2024	6	0,33	26	325
J-135	3,2155	0,32	1,21	-
	Módulo de elasticidade E ₁ (GPa)	Módulo de elasticidade E ₂ (GPa)	Coefficiente de Poisson	Módulo de corte G ₁₂ (GPa)
CFRP	130	10	0,2	5

Foram efetuados cinco ensaios distintos e registadas todas as curvas força-deslocamento e, apesar de as geometrias serem iguais em todos os ensaios, registaram-se comportamentos distintos. O tipo de rotura que ocorreu foi comum em todas as amostras (rotura coesiva) e teve origem na zona de maior concentração de adesivo. Para comparação de resultados, os autores recorreram a MEF usando o *software* Abaqus® (Figura 30). Foram definidas todas as condições de fronteira e o volume definido para cada elemento da malha foi 0,5×0,5×0,05 mm³.

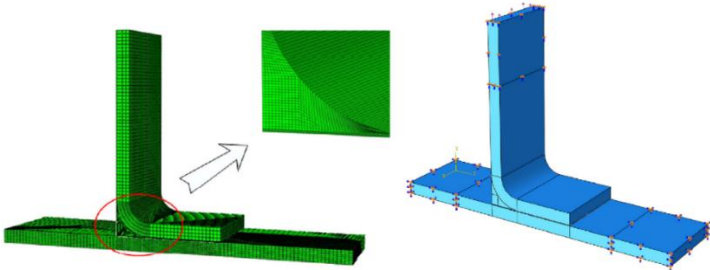


Figura 30 - Modelo de elementos finitos e condições fronteira [22].

A simulação numérica teve como objetivo avaliar a influência das dimensões do substrato em L na resistência da junta e na distribuição de tensões no adesivo. Foram definidos o adesivo e o alumínio como sólidos com propriedades isotrópicas, e para o compósito foi utilizada a funcionalidade de laminados de compósito do *software* (que permite a obtenção de propriedades isotrópicas equivalentes para laminados em função de sequência de empilhamento). Após recolhidos todos os valores dos ensaios, procedeu-se à análise das tensões médias nas três análises – experimental, numérica e analítica (Figura 31).

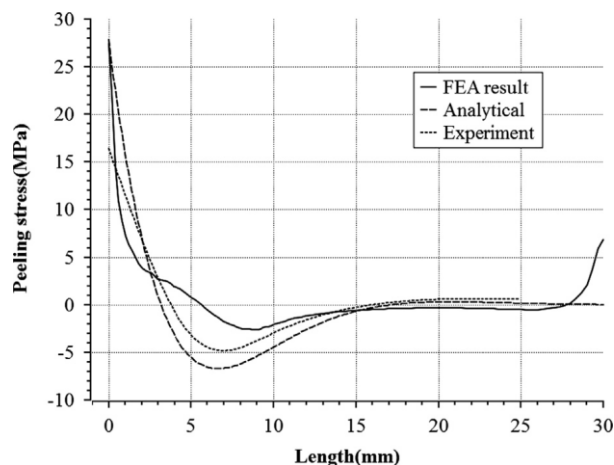


Figura 31 - Análise das tensões médias de arrancamento (experimental, numérica e analítica) [22].

Os autores recorreram à colocação de extensômetros para efeitos de comparação entre a análise numérica, experimental e analítica de modo a analisar as deformações e respetivos valores. Após comparação de resultados, foi possível concluir que era desapropriado modelar os substratos como um corpo rígido e assumir que não iria influenciar a distribuição de tensões. Foi também possível concluir que as amostras sofreram maiores tensões no início do arrancamento e que o valor máximo depende das propriedades geométricas e mecânicas do adesivo.

Por outro lado, os resultados numéricos foram muito diferentes dos valores experimentais e foram capazes de fornecer de uma maneira bastante eficaz resultados e previsões da resistência das juntas em L fabricadas em alumínio e materiais compósitos, bastante utilizados em aplicações de engenharia.

Guo et al. [23] investigaram o mecanismo de falha de um design de junta T alternativo em material compósito sujeito a uma tensão de arrancamento. Para isso foram construídos dois tipos de junta T, uma com um corte circular de 40 mm de diâmetro e um segundo tipo sem o corte circular (Figura 32).

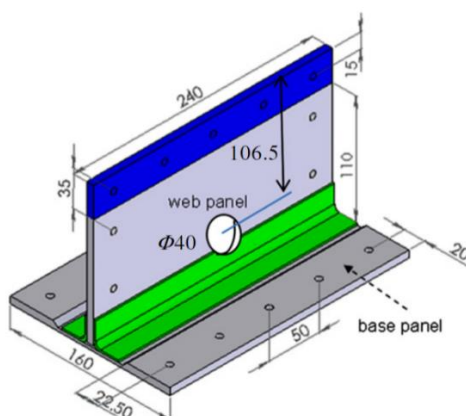


Figura 32 - Geometria da junta T (mm) [23].

A junta foi produzida em estrutura *sandwich*. A base e altura possuem um núcleo em espuma com 5 mm de espessura. Na extremidade e faces, a junta foi fabricada com duas placas de laminado de 1 mm de espessura, constituída por 4 camadas, em fibra de carbono-epóxico pré-impregnado (MTM46/HTS) e com orientação $(\pm 45)_s$. A base da junta com 2 mm de espessura foi construída com camadas em fibra de carbono epóxico pré-impregnado com orientação $(\pm 45/0/90)_s$ (Figura 33). Foram considerados três adesivos neste estudo, o Hysol EA 9394, Hysol EA 9396 e ACG MTA 240.

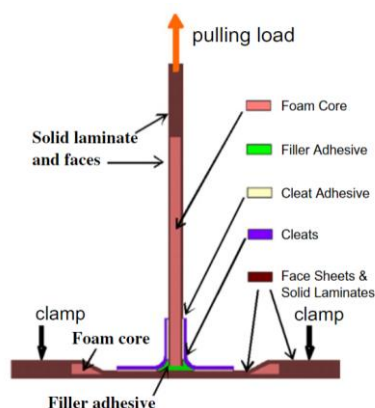


Figura 33 - Componentes usados na junta [23].

Neste estudo foram testadas 3 amostras sem o corte cilíndrico (P_a ; P_b ; P_c) e 2 amostras com o corte cilíndrico (P_d ; P_e) e posteriormente também foi feito um estudo numérico usando o MEF (Figura 34). Neste modelo definiu-se uma base com 5 parafusos na superfície da zona de aperto e considerou-se uma análise da rotura nas zonas dos reforços, no adesivo de preenchimento e no adesivo de ligação dos calços considerados como locais críticos.

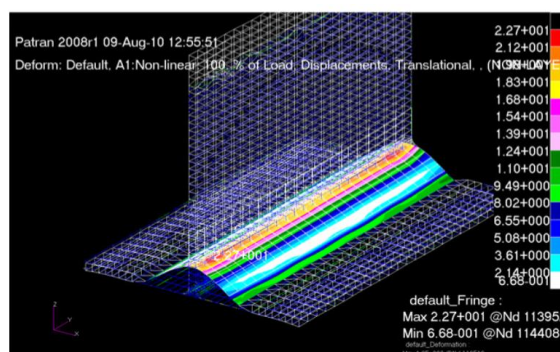


Figura 34 - Análise da junta por MEF [23].

Verificou-se uma diminuição da carga máxima de cerca de 18% para a estrutura com corte cilíndrico, em relação à estrutura sem corte cilíndrico. Foram comparados os resultados experimentais com os resultados obtidos no MEF (Figura 35).

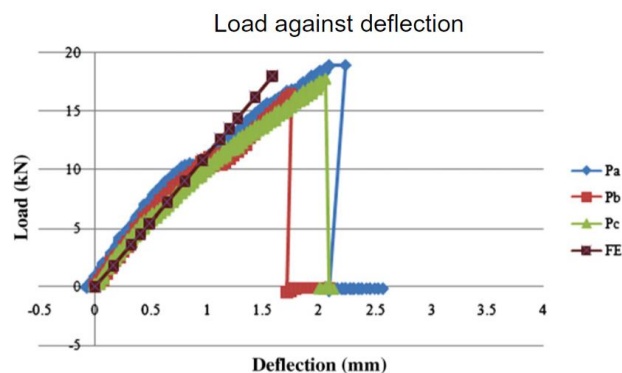


Figura 35 - Curvas $P-\delta$ para cada tipo de junta em T [23].

Após os testes experimentais, as três juntas sem o corte cilíndrico foram reparadas. O adesivo que foi considerado na reparação foi o 3M 7823, pois os reforços da junta P_a ficaram danificados durante a reparação no processo de limpeza. Na reparação das juntas não foi usado o adesivo de enchimento representado na Figura 33 (*filler adhesive*). Os resultados obtidos após reparação das juntas estão representados na Figura 36.

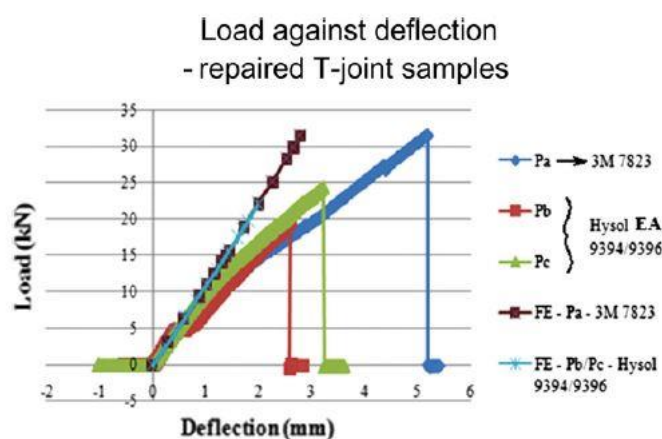


Figura 36 - Curvas $P-\delta$ para os três tipos de junta T após reparação [23].

Concluiu-se que a junta com corte cilíndrico teve uma diminuição de 25% na carga máxima comparativamente com a junta sem o corte. Para o MEF, verificou-se uma diferença de aproximadamente 14% na carga máxima em comparação com os resultados experimentais. Experimentalmente obteve-se melhorias consideráveis nas juntas reparadas, entre 16% e 37% para a carga máxima até à rotura, no entanto, estes resultados comparados com os do MEF verificou-se uma diferença de 10% e 0,6%, respetivamente.

2.3 Previsão de resistência de juntas adesivas

A utilização das juntas adesivas está profundamente relacionada com a evolução de métodos de previsão fiáveis. Estes métodos permitam aumentar a eficiência na sua utilização, tornando assim possível ultrapassar o tradicional sobredimensionamento das juntas adesivas. Este sobredimensionamento resultava em estruturas mais pesadas e mais dispendiosas, relacionado com a falta de modelos materiais precisos e de critérios de rotura mais adequados. Os dois métodos que podem ser aplicados para a análise de juntas adesivas são as análises de forma fechada (métodos analíticos) e os métodos numéricos.

2.3.1 Modelos analíticos

Os primeiros investigadores a explorar métodos analíticos foram Volkersen [24] e Goland e Reissner [25], que possuíam modelos bastante simples como modo de obter as distribuições de tensões em juntas adesivas.

Na década de 30, houve alguns avanços no estudo das juntas adesivas com o método analítico de Volkersen [24], que partiu do princípio de que os materiais eram inteiramente plásticos e que a deformação do adesivo apenas ocorria ao corte. No entanto, a formulação analítica torna-se mais complicada e difícil, quando o adesivo se deforma plasticamente, na presença de substratos compósitos e com diferentes materiais a ligar.

As simplificações de geometria, solicitações e condições fronteira, assim como a previsão da resistência da junta colada fundamentada em critérios de tensões ou deformações, fazem com que estes estudos analíticos sejam habitualmente substituídos por métodos numéricos.

2.3.2 Métodos numéricos

O MEF [26] é então a técnica mais comum a ser utilizada para a análise de projetos de junta, tendo sido aplicada por Harris e Adams [27], que introduziram outros fatores como a rotação da junta, a plasticidade dos substratos, e adesivo e a influência dos filetes da junta. Posto isto, recorreu-se à mecânica dos meios contínuos para a previsão da resistência de juntas adesivas, que exige a distribuição de tensões e um critério de rotura apropriado. O MEF pode também ser utilizado simultaneamente com técnicas da mecânica de fratura para a previsão da resistência, quer pelo fator de intensidade das tensões quer por abordagens energéticas como a técnica do fecho da fenda virtual (TFFV). Contudo, estas técnicas de modelação dificultam a avaliação do desenvolvimento da fenda devido à necessidade de voltar a criar a malha durante a propagação da fenda, o que pode ter repercussões ao nível do esforço computacional [28]. Os métodos numéricos mais utilizados atualmente são: a mecânica dos meios contínuos, mecânica da fratura e modelos de dano coesivo (enquadráveis na

mecânica do dano). Menos utilizados são os modelos de dano alternativos aos modelos coesivos [29-33] e o método de elementos finitos estendido (MEFX) [34-36].

A modelação numérica tem sido alvo de grandes avanços nas duas últimas décadas, sendo um deles a modelação de dano por modelos de dano coesivo (MDC). Esta técnica agrupa a modelação convencional por MEF para as zonas em que não é previsto dano com a mecânica de fratura, através da utilização de elementos coesivos para promover o desenvolvimento e propagação de fendas.

2.3.2.1 Mecânica dos meios contínuos

A mecânica dos meios contínuos é uma técnica que utiliza modelos analíticos ou numéricos, como o MEF, para obter valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação. A previsão é executada através da utilização de parâmetros como a tensão ou deformação máxima, tensão ou deformação pontual a uma certa distância, tensão ou deformação média sobre uma certa região ou análise de estado limite.

Para o efeito, os valores obtidos pelos modelos são comparados com os valores admissíveis dos materiais, o que possibilita estimar a resistência das ligações adesivas. Na previsão da resistência de juntas adesivas de sobreposição através de métodos analíticos, uma forma simples é usar o modelo de Volkersen [24], que admite que o adesivo se deforma apenas ao corte. Pode-se assim considerar a tensão máxima de corte como um critério de rotura. Adams et al. [37] usaram o critério da tensão principal máxima obtida pelo MEF para prever a resistência de juntas adesivas, obtendo bons resultados. Para estes mesmos autores, um fator relevante no estudo das tensões e deformações por métodos numéricos é a dimensão da malha, devido à existência de singularidade das tensões nas extremidades de L_0 . Os critérios de dano baseados na mecânica dos meios contínuos aplicados em modelos analíticos são bastante intuitivos e conseguem em alguns casos traduzir-se em resultados satisfatórios [38]. Porém, estes podem ser bastante complexos sem que as suas previsões sejam realistas. Estes critérios não têm em consideração as concentrações de tensões existentes em ranhuras em entalhes, nem a existência de defeitos no adesivo. De acordo com Harris and Adams [27], em casos onde se utilizam adesivos dúcteis, os critérios existentes baseados em tensões não são os mais adequados porque, após o adesivo ceder, ainda suporta elevadas deformações antes da sua rotura.

2.3.2.2 Mecânica da fratura

A mecânica dos meios contínuos estabelece que a estrutura e o seu material são contínuos, o que não se ajusta no caso de existirem materiais com defeitos ou para materiais que tenham cantos reentrantes ou outras singularidades de tensão. Por outro lado, a mecânica da fratura assume que a estrutura não é forçosamente um meio contínuo, podendo apresentar alguns defeitos (fendas por exemplo) causados pelos processos de fabrico ou por outros fatores durante o seu funcionamento. Existe

teoricamente uma singularidade sempre que o ângulo das faces adjacentes é inferior a 180° . Este efeito é extensível para a singularidade de tensões na interface entre dois materiais ligados. A descontinuidade de tensões neste caso continua a existir, apesar de deixarem de existir superfícies livres. A mecânica da fratura permite estimar se estes defeitos podem causar uma rotura catastrófica, ou se, durante o tempo de funcionamento da estrutura, estes se mantêm com dimensões inferiores às críticas, apesar de se poder propagar, de forma a manter a segurança da estrutura. A fratura pela propagação de fendas pode ser iniciada por diferentes causas, como a aplicação de cargas lentas, de impacto, por fadiga, devido a gradientes de temperatura ou ainda por deformações dependentes do tempo [4]. Os fundamentos básicos da mecânica da fratura devem-se ao estudo vanguardista de Griffith [39] através do estudo de fraturas em fibras de vidro, que lhe permitiu concluir que todas as peças apresentam defeitos, e que a fratura ocorre a partir do ponto mais crítico.

Na indústria aeronáutica foi exposto o conceito de projeto com tolerância ao dano, que se assentava em conceitos da fratura linear elástica. Em materiais dúcteis, uma certa quantidade de material plastifica antes iniciar a fenda, e essa mesma fenda propaga-se de forma estável antes da rotura final [40]. Como a teoria da mecânica da fratura linear elástica, esta teoria não é adequada para este tipo de materiais e então foi criada a solução de HRR (Hutchinson-Rice-Rosengreen) por Hutchinson [41] e por Rice [42] para modelar roturas dúcteis.

A grande maioria dos estudos em juntas adesivas utilizam a taxa de libertação de energia (G_I ou G_{II}) e também o respetivo valor crítico ou resistência à fratura (G_c) [43], em vez de utilizarem fatores de intensidade de tensão, porque estes não são determináveis facilmente quando a fenda se propaga numa interface ou na sua proximidade. Em juntas adesivas a fratura tem lugar em modo misto devido às propriedades distintas dos adesivos à tração e ao corte, mas também pelo efeito dos substratos, pelo que se torna necessário apresentar o conceito de envelope da fratura. Este conceito fornece uma função para a rotura, que envolve as componentes de tenacidade de tração e corte quando as duas estão presentes na solitação.

2.3.2.3 Modelos de dano coesivo (MDC) e as suas leis

No decorrer dos anos, foram estudados vários modelos de dano coesivo, como o modelo linear triangular [44], parabólico [45], exponencial [46], polinomial [47] e trapezoidal [48]. Com base no comportamento do material ou na interface em simulação, podem ser estimadas diferentes formas de leis coesivas com o objetivo de obter resultados mais concretos [49].

A lei triangular é a lei mais utilizada devido ao número reduzido de parâmetros a serem determinados, à sua simplicidade e também pelos resultados obtidos para a maioria das condições reais [50]. Trata-se de um modelo coesivo baseado em elementos finitos de interface [51] de seis nós e espessura zero, compatíveis com os elementos sólidos

bidimensionais de oito nós do *software* Abaqus®. Neste tipo de modelo de dano são apresentadas duas versões distintas: modo puro e modo misto (Figura 37).

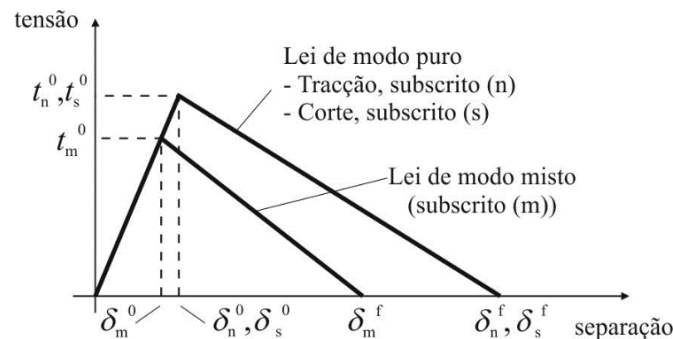


Figura 37 - Modelo coesivo triangular [51, 52].

O modo puro (lei de maiores dimensões) traduz-se pela propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respetivo são anulados na lei coesiva correspondente. O modo misto é a lei de menores dimensões e caracteriza-se por utilizar critérios energéticos e de tensões para combinar os modos puros de tração e corte [53].

Outro tipo de lei coesiva muito utilizada é a lei coesiva trapezoidal, que diz respeito à simulação do comportamento mecânico de camadas finas de adesivos dúcteis. Estas leis simulam de uma forma adequada o comportamento de camadas finas de adesivos dúcteis em modo I [54] e modo II [55].

2.3.2.4 Mecânica do dano

A mecânica do dano aqui apresentada diz respeito a métodos alternativos aos MDC, que possibilitam a introdução de dano nos elementos pela diminuição dos esforços transmitidos. Os métodos utilizados na mecânica do dano criam um parâmetro de dano para modificar o comportamento dos materiais através da redução de resistência ou rigidez. Os estudos de Daudeville and Ladevèze [31] são exemplos desta metodologia e referem-se à delaminação de compósitos ou rotura da matriz, ou de Khoramishad et al. [30] para camadas finas de adesivo. Como resultado do parâmetro de dano estabelecido, torna-se possível a simulação gradual do dano e da fratura de uma fenda, com trajetória pré-concebida ou não, dentro de uma região limitada [56].

As variáveis de dano podem ser organizadas em dois grupos. No primeiro grupo as variáveis modelam o dano pela redefinição das propriedades constitutivas dos materiais, no entanto estas não estão diretamente relacionadas com o mecanismo de dano.

No segundo grupo, as variáveis são relacionadas com o significado físico de um género específico de dano, como a dimensão das porosidades ou a área relativa de micro-

cavidades [57]. Pela mecânica do dano, o desenvolvimento do dano é determinado em função da carga para simulações estáticas [58] ou do número de ciclos para análises de fadiga [59, 60]. Em comparação aos MDC e, em utilizações específicas, a mecânica do dano pode ser aconselhada caso o dano seja generalizado ou caso o caminho de propagação da fenda não seja conhecido já que, pelos MDC, a propagação da fenda é limitada a trajetos pré-estabelecidos [33].

Hua et al. [61] recomendaram um modelo de mecânica do dano com resultados independentes da malha para a previsão de resistência de juntas adesivas com um adesivo dúctil, sujeitas a degradação ambiental. Na modelação numérica, este efeito era conseguido com a introdução de um parâmetro de dano com base no deslocamento na equação constitutiva dos materiais, dependente do grau de humidade. Este parâmetro de dano foi aferido através de ensaios à fratura em provetes à flexão em modo misto, o que permitiu reduzir os valores de tensão na junta dependendo do deslocamento plástico equivalente, o que permitiu obter resultados independentes da malha. As previsões da resistência da junta e do caminho do dano foram coerentes com os resultados experimentais.

Chen et al. [62] utilizaram uma técnica da mecânica do dano em juntas de sobreposição simples (JSS) baseada na energia de deformação plástica média para a previsão do início e propagação do dano, e também da carga de rotura. A técnica utilizada consistiu em analisar, após obter uma solução convergente num dado incremento de carga, se a condição de rotura tinha sido atingida nalgum elemento da estrutura. Perante estas condições, os valores de E e do coeficiente de Poisson (ν) do material na respetiva zona eram reduzidos quase até zero para simular a existência de rotura. A comparação dos resultados obtidos por esta técnica e os ensaios experimentais revelou resultados bastante positivos.

2.3.2.5 Método de Elementos Finitos Estendido (MEFX)

O MEFX é um desenvolvimento recente do MEF, e permite o estudo e modelação do crescimento do dano para previsão da fratura em estruturas. Este método é baseado na resistência dos materiais para a iniciação do dano e em deformações para a avaliação da rotura, em vez dos valores de t_n^0/t_s^0 ou δ_n^0/δ_s^0 (deslocamentos de tração e corte, respetivamente) utilizados no MDC, pela mesma ordem.

No MEFX, e comparativamente com os MDC, não é importante se a fenda siga um caminho já definido, o que por sinal constitui uma enorme vantagem. Assim, a fenda pode-se propagar livremente no interior da estrutura sem ser necessário que a malha coincida com a geometria das descontinuidades e sem a necessidade de refazer a malha na proximidade da fenda [63].

No final dos anos 90, Belytschko and Black [35] exibiram as características mais importantes deste método, baseadas no conceito de partição de unidade, que pode ser

realizado no MEF pela inclusão de funções de enriquecimento local para os deslocamentos perto da extremidade da fenda, para possibilitar o crescimento e separação entre as faces da fenda [36]. Devido ao crescimento da fenda, a sua extremidade muda a sua posição e orientação constantemente, dependendo das condições de carga e da geometria da estrutura, e em ao mesmo tempo são criadas funções de enriquecimento necessárias para os pontos nodais dos elementos finitos na proximidade da extremidade da fenda.

O MEFX considera numa primeira abordagem um comportamento linear elástico dos materiais, que é representado por uma matriz constitutiva elástica que relaciona tensões com as separações normais e de corte. O dano e a rotura são simulados pelo MEFX por critérios de iniciação de dano e leis de dano entre nós irrealis e reais de elementos fraturados. Os critérios de iniciação de dano podem por exemplo depender das tensões principais máximas ou das deformações principais máximas. Por outro lado as leis tração-separação que simulam a degradação dos materiais até à fratura podem ser lineares ou exponenciais [64].

Campilho et al. [65] utilizaram o MEFX para a previsão da resistência de juntas de sobreposição simples e dupla, ligadas com um adesivo dúctil, onde se compararam resultados entre o MEFX e os MDC (Figura 38). Os autores chegaram à conclusão que o MEFX não é o método mais apropriado para propagação do dano em modo misto na camada de adesivo, uma vez que a direção da fenda é perpendicular à tensão principal máxima, o que se traduz na propagação do dano na direção dos substratos em vez ser ao longo da camada de adesivo, o que não é representativo do comportamento real das juntas.

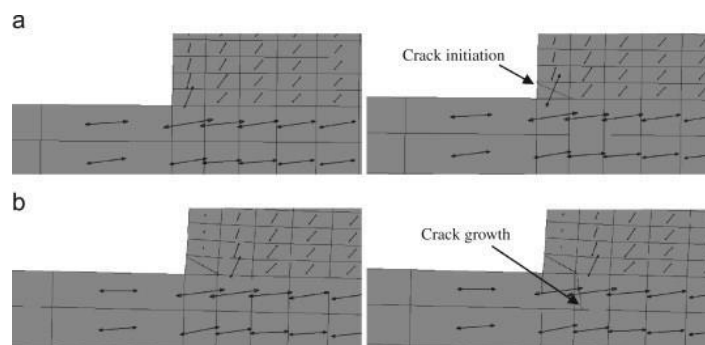


Figura 38 - Representação das tensões usando o MEFX em JSS: iniciação do dano do adesivo nas extremidades de sobreposição (a) e crescimento dano do susbtrato de alumínio (b) [65].

DESENVOLVIMENTO

3.1 Validação experimental

3.2 Trabalho numérico

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Validação experimental

Neste capítulo são apresentados os resultados principais do trabalho realizado por Carneiro [66] em juntas T para efeitos de validação experimental da técnica numérica usada neste trabalho (MDC). Este autor realizou um estudo em juntas T com diferentes espessuras (t_{p2}) e com dois tipos de adesivos. Para o fabrico das juntas foi utilizada uma liga de alumínio.

É descrito o processo de fabricação e os testes experimentais realizados. São também apresentados os modos de rotura, as curvas $P-\delta$, a resistência das juntas e a análise e comparação dos resultados obtidos com os resultados numéricos. O *software* utilizado no estudo numérico foi o ABAQUS®.

Para efeitos de validação experimental, são analisados apenas os resultados experimentais e numéricos de um dos adesivos utilizados - Araldite® AV138.

3.1.1 Materiais utilizados

Os provetes foram fabricados com substratos de alumínio AW 6082-T651 e com adesivo Araldite® AV138.

A liga de alumínio AW 6082-T651 é uma liga estrutural da série 6000, com cerca 82% de alumínio e magnésio e silício como principais elementos de liga.

O adesivo Araldite® AV138 é um adesivo estrutural da marca *Huntsman Advanced Materials*, que possui elevada resistência, mas caracteriza-se pela sua fragilidade. É especialmente utilizado para a ligação de diferentes tipos de materiais, como metais, compósitos e polímeros [67].

3.1.2 Geometria das juntas

A geometria da junta adesiva que foi utilizada é constituída por uma base em alumínio colada a dois substratos em L sobrepostos, também em alumínio. A união da junta foi feita com recurso ao adesivo Araldite® AV138. Na Figura 39 está representada a geometria da junta e os parâmetros pré-estabelecidos pelo autor.

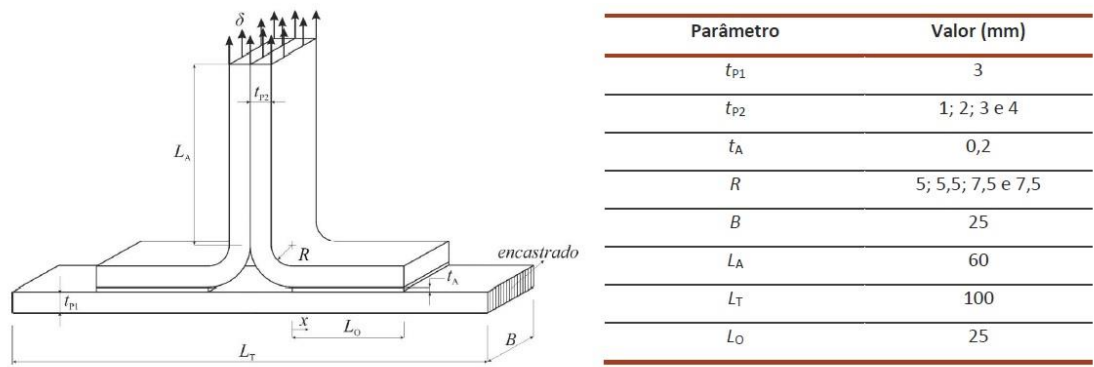


Figura 39 - Geometria da junta e respectivos parâmetros analisados (t_{p2}) [66].

3.1.3 Processo de fabrico

O processo de fabrico das juntas foi iniciado com o corte de todos os substratos de alumínio para a execução dos substratos em L e para os substratos da base. De seguida foi feita uma dobragem numa prensa manual para a obtenção dos substratos em L. Esses substratos foram lixados e limpos com papel embebido em acetona.

Após o processo de fabrico dos substratos, foi iniciada a preparação do adesivo Araldite® AV138. A preparação consistiu numa quantidade de resina/endurecedor de 10 g/4 g e foi misturada manualmente até ao adesivo se encontrar homogéneo. Após a mistura, o adesivo foi aplicado manualmente.

Foi usada uma fita calibrada de 0,2 mm para garantir o valor de t_A , que foi unida ao substrato da base usando uma cola de cianoacrilato.

Após aplicação do adesivo, foram usadas molas para facilitar a fixação e garantir o posicionamento dos diferentes constituintes da junta. O tempo de cura foi de 7 dias à temperatura ambiente. Passado o tempo de cura, foram eliminados os excessos de adesivo nas juntas. Na Figura 40 é possível verificar uma das juntas fabricadas pelo autor.

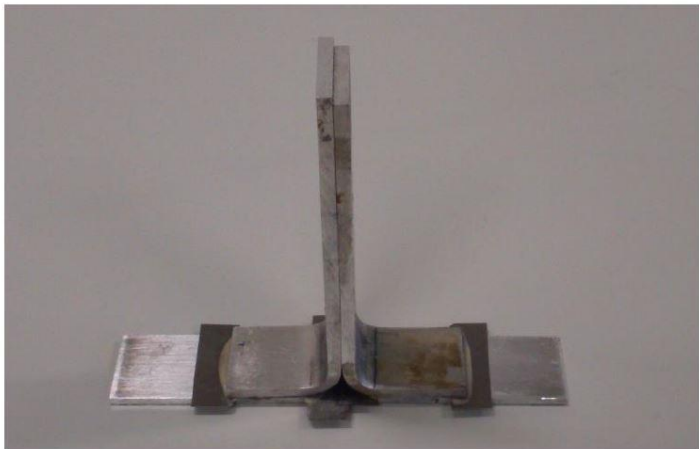


Figura 40 - Exemplo de junta fabricada pelo autor [66].

3.1.4 Ensaio das juntas

O ensaio das juntas foi realizado numa máquina de ensaios Shimadzu AG-X 100. As juntas em T foram solicitadas à tração e encastradas no substrato base (Figura 41). Nas juntas executadas com o adesivo Araldite® AV138 foi usada uma velocidade de ensaio de 0,5 mm/min.



Figura 41 - Equipamento utilizado e encastramento do substrato base [66].

A solicitação das juntas foi realizada a velocidade constante até à separação total dos substratos em L com o substrato base. O encastramento das juntas foi garantido por com auxílio de um suporte em alumínio. Este suporte fixou os substratos base através de barras móveis e aparafusadas, o que permitiu um comprimento livre de 100 mm entre pontos de encastramento.

3.1.5 Resultados obtidos

Para cada t_{p2} obtiveram-se gráficos representativos do comportamento dos vários provetes ensaiados. Foram retiradas as curvas $P-\delta$, verificados os modos de rotura de todos os provetes ensaiados, recolhida a resistência das juntas em função de t_{p2} , e feita uma análise desses resultados.

3.1.5.1 Curvas $P-\delta$

Na Figura 42 estão representadas as curvas $P-\delta$ registadas nos ensaios dos provetes de juntas adesivas com o adesivo Araldite® AV138, para cada valor de t_{p2} .

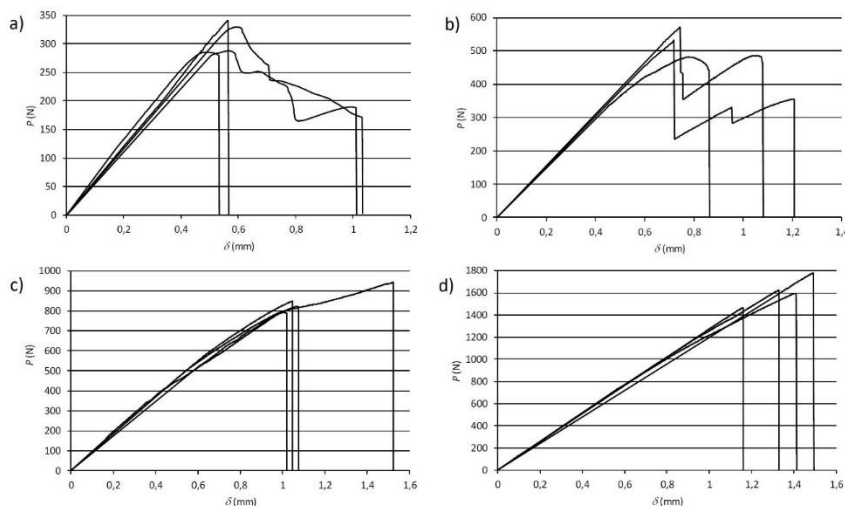


Figura 42 - Curvas P - δ : a) $t_{p2}=1$ mm; b) $t_{p2}=2$ mm; c) $t_{p2}=3$ mm e d) $t_{p2}=4$ mm [66].

A partir da análise das curvas P - δ , o autor verificou uma relação entre o aumento de t_{p2} e o valor de $P_{máx}$. As juntas apresentaram inicialmente um comportamento elástico até atingir $P_{máx}$. Após se atingir $P_{máx}$ as juntas apresentaram um comportamento plástico do adesivo até à rotura.

Analisando a Figura 42, as curvas P - δ apresentaram uma correlação no que diz respeito à resistência máxima e respetivo deslocamento de rotura, à exceção de uma das juntas em que se obteve um deslocamento abaixo das restantes. Como causa possível, o autor atribui ao mau fabrico dessa junta. Devido à fragilidade do adesivo, os deslocamentos de rotura foram baixos, e para $t_{p2}=4$ mm o deslocamento foi maior.

Em resumo, com o aumento dos valores de t_{p2} a resistência da junta aumenta.

3.1.5.2 Modos de rotura

Na Figura 43 estão representados os 5 provetes de juntas adesivas com adesivo Araldite® AV138 com $t_{p2}=1$ mm.

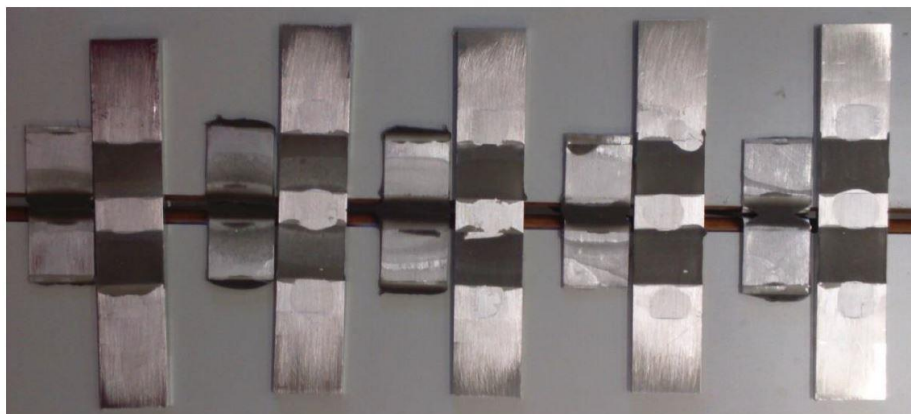


Figura 43 – Superfície de rotura das juntas adesivas com $t_{p2}=1$ mm [66].

Foi verificado pelo autor que os modos de rotura para as juntas adesivas com o Araldite® AV138 foram semelhantes para todos os valores de t_{p2} e que a presença de adesivo em ambos os substratos é representativa de uma rotura coesiva.

3.1.5.3 Resistência das juntas

O autor considerou no mínimo três provetes para calcular as médias e o desvio padrão de cada configuração de junta. A Figura 44 representa os valores experimentais de $P_{m\acute{a}x}$ em função de t_{p2} das juntas adesivas com o adesivo Araldite® AV138 e Araldite® 2015 (adesivo que não foi considerado para efeitos de validação experimental deste trabalho).

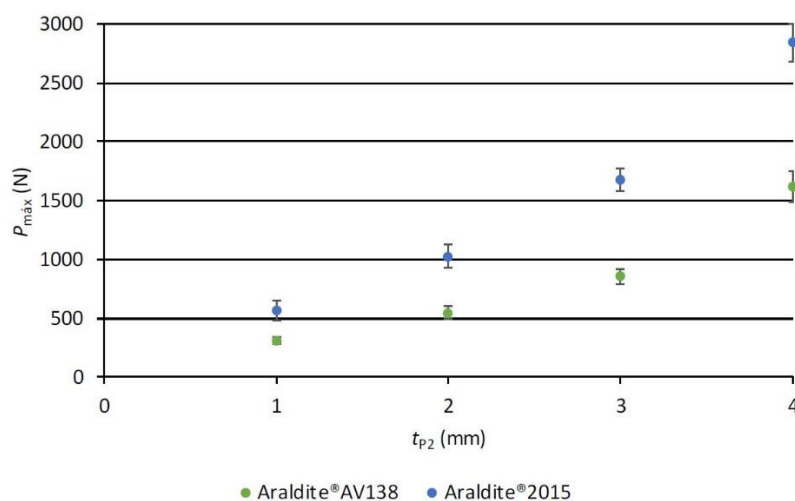


Figura 44 - Valores experimentais de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos nas juntas adesivas com Araldite® AV138 e Araldite® 2015 [66].

A partir da análise da Figura 44 o autor concluiu que, os valores de $P_{m\acute{a}x}$ aumentam com o aumento de t_{p2} . Verificou-se também um maior aumento da resistência entre as juntas com $t_{p2}=3$ e 4 mm.

Sendo o valor de $P_{m\acute{a}x}$ para $t_{p2}=1$ mm tido como referência, o aumento percentual dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ relativamente à junta com $t_{p2}=1$ mm foi de 75,0% ($t_{p2}=2$ mm), 173,8% ($t_{p2}=3$ mm) e 419,3% ($t_{p2}=4$ mm).

3.1.5.4 Comparação de resultados

Na Figura 45 estão representadas as curvas P - δ experimentais das juntas para os diferentes valores de t_{p2} . O autor concluiu que as curvas apresentaram um comportamento idêntico no regime elástico, mas verificou algumas diferenças nos valores de P após atingir $P_{m\acute{a}x}$.

Para $t_{p2}=1$ mm, verificou-se uma semelhança de $P_{m\acute{a}x}$ e respetivo deslocamento entre as curvas P - δ experimentais e numéricas, mas o deslocamento de rotura foi ligeiramente superior na análise numérica.

Para $t_{p2}=2$ mm, verificou alguma discrepância ao longo do processo de rotura. Os valores de P também apresentaram um comportamento ligeiramente diferente entre as curvas experimentais e numérica. Os deslocamentos correspondentes a $P_{m\acute{a}x}$ estiveram bastante pr\'oximos.

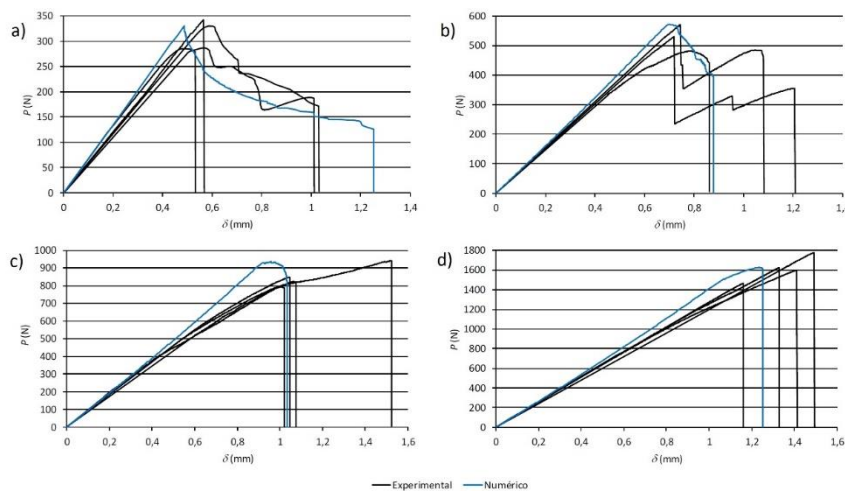


Figura 45 – Comparação das curvas P - δ experimentais e numéricas: a) $t_{p2}=1$ mm; b) $t_{p2}=2$ mm; c) $t_{p2}=3$ mm e d) $t_{p2}=4$ mm [66].

Em relação a $t_{p2}=3$ e 4 mm verificou-se uma proximidade das várias curvas P - δ experimentais com a curva P - δ numérica. Para $t_{p2}=3$ mm, verificou-se que uma das curvas experimentais obteve um deslocamento de rotura muito superior às restantes juntas, no entanto é visível que até ao ponto de $P_{m\acute{a}x}$ a fase elástica não apresenta um comportamento linear. Segundo o autor, este comportamento deve-se à existência de escorregamento nas garras da máquina de ensaios. As curvas P - δ experimentais das juntas com $t_{p2}=4$ mm atingiram um valor de $P_{m\acute{a}x}$ superior à junta numérica. O autor atribui esses valores à má preparação das juntas, e é referida a existência de um filete de adesivo entre substratos que pode elevar o valor de $P_{m\acute{a}x}$.

Em geral, concluiu-se que para todos os valores de t_{p2} , as juntas experimentais obtiveram um comportamento similar e aceitável, em comparação com as várias juntas numéricas.

3.2 Trabalho numérico

A simulação computacional é bastante utilizada nas empresas com a intenção de realizar análises e melhorar a qualidade dos produtos e projetos. Este tipo de *software* que utiliza o Método dos Elementos Finitos, possibilita a obtenção de respostas para inúmeros problemas de engenharia. Estas simulações numéricas permitem compreender mais detalhadamente o comportamento de juntas adesivas. Assim, as experiências laboratoriais e as simulações numéricas são as principais técnicas para conhecer e estudar o comportamento de juntas adesivas.

3.2.1 Geometria das juntas

A junta adesiva em estudo nesta dissertação é uma junta em forma de T (Figura 46).

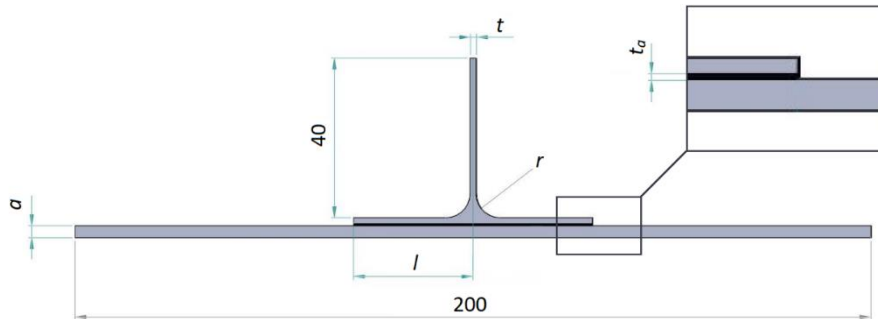


Figura 46 - Representação da junta estudada.

A junta adesiva é constituída por uma base em alumínio de 200 mm de comprimento e 25 mm de largura (Figura 47) e está ligada a um substrato em T, também em alumínio e com geometria variável.

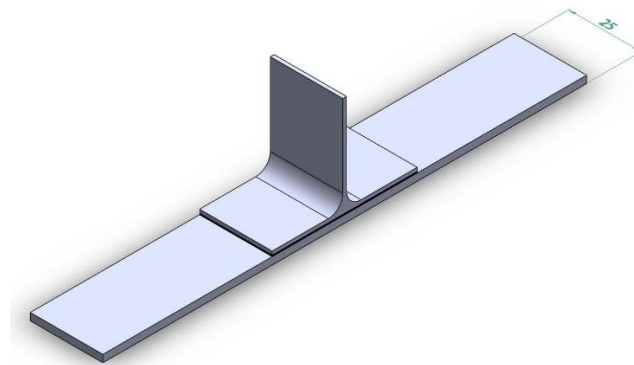


Figura 47 - Vista isométrica da junta.

É analisada a junta adesiva com três adesivos distintos: Araldite® AV138, Araldite® 2015 e o SikaForce® 7752. O valor de t_a manteve-se constante – 0,2 mm. Na Tabela 4 estão representados os parâmetros definidos e os respectivos valores. A geometria base para o estudo foi a seguinte: $a=3$; $l=30$; $t=1,5$ e $r=6$ (mm).

Tabela 4 - Parâmetros usados e os respectivos valores.

Parâmetro	Valor (mm)
Espessura da base (a)	1 ; 2 ; 3 ; 4
Espessura do T (t)	0,5 ; 1 ; 1,5 ; 2 ; 2,5
Comprimento de sobreposição (l)	10 ; 20 ; 30 ; 40
Raio do T (r)	3 ; 6 ; 9 ; 12

3.2.2 Materiais

3.2.2.1 Alumínio AW6082-T651

Nesta dissertação foi utilizada uma liga de alumínio da série 6000, a liga AW6082 – T651. Esta liga de alumínio é essencialmente constituída por magnésio e silício e é geralmente usada na indústria naval, indústria automóvel, em peças de precisão, entre outras aplicações. Apresenta alta resistência à corrosão, boa condutividade térmica e é bastante leve. Quando solicitada à tração, esta liga apresenta uma elevada resistência, chegando a valores na ordem dos 340 MPa (de acordo com o fabricante). É obtida através do envelhecimento artificial a uma temperatura de aproximadamente 180°C [68]. Na Tabela 5 está representada a sua composição química.

Tabela 5 - Composição química da liga de alumínio AW 6082-T651.

	Si	Mg	Mn	Fe	Cr	Zn	Ti	Cu	Al
%	0,7 a 1,3	0,6 a 1,2	0,4 a 1	0 a 0,5	0 a 0,25	0 a 0,2	0 a 0,1	0 a 0,05	restante

Campilho et al. [13] caracterizaram esta liga à tração de acordo com a norma ASTM E8M [69] e fizeram uma aproximação numérica da curva tensão - deformação (σ - ϵ) (Figura 48).

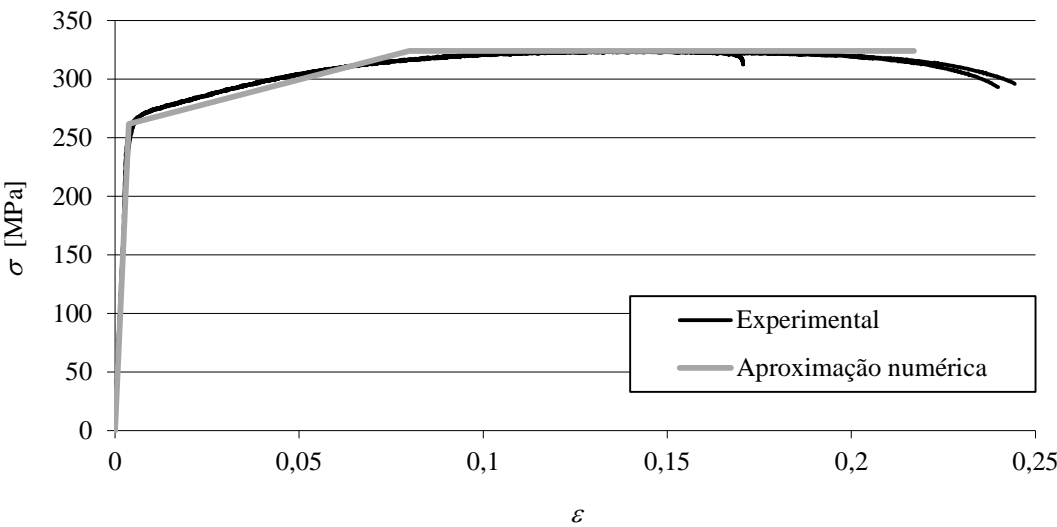


Figura 48 - Curvas σ - ϵ da liga de alumínio AW6082 T651 - experimental e numérica [13].

Na Tabela 6 estão apresentadas as propriedades mecânicas registadas.

Tabela 6 - Propriedades mecânicas da liga AW6082 T651 [13].

Módulo de elasticidade (E)	Tensão de cedência (σ_e)	Tensão máxima (σ_f)	Deformação (ϵ_f)
70,07 \pm 0,83 GPa	261,67 \pm 7,65 MPa	324 \pm 0,16 MPa	21,7 \pm 4,2%

3.2.2.2 Araldite® AV138

O adesivo estrutural Araldite® AV138 é produzido pela empresa *Huntsman Advanced Materials*. Caracteriza-se pela sua fragilidade e por ser bastante sensível a defeitos de fabricação, mas não deixa de ser um adesivo de alta resistência mecânica [70]. É um adesivo bi-componente com o endurecedor HV 998, apresenta-se em forma de pasta e é curado à temperatura ambiente [71].

Campilho et al. [13] efetuaram ensaios de tração em provetes maciços e através da análise das curvas σ - ε e foi possível verificar o comportamento frágil do adesivo (Figura 49).

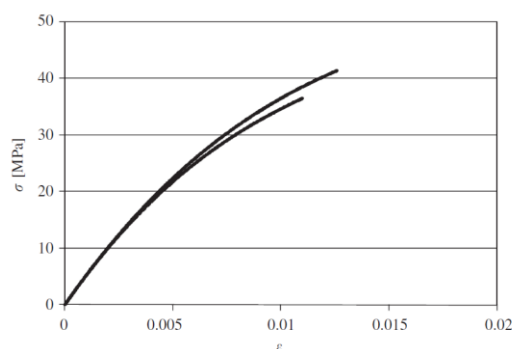


Figura 49 – Curvas σ - ε experimentais - Araldite® AV138 [13].

Na Tabela 7 estão presentes as propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® AV138.

Tabela 7 - Propriedades mecânicas e de fratura do Araldite® AV138 [13, 70, 72].

Propriedade	Valor
Módulo de Young, E (GPa)	$4,89 \pm 0,81$
Coefficiente de Poisson, ν	0,35
Tensão de cedência à tração, σ_e (MPa)	$36,49 \pm 2,47$
Tensão de rotura à tração, σ_f (MPa)	$39,45 \pm 3,18$
Deformação de rotura à tração, ε_f (%)	$1,21 \pm 0,10$
Módulo de elasticidade transversal, G (GPa)	$1,56 \pm 0,01$
Tensão de cedência ao corte, τ_y (MPa)	$25,10 \pm 0,33$
Tensão de rotura ao corte, τ_f (MPa)	$30,20 \pm 0,40$
Deformação de rotura ao corte, γ_f (%)	$7,80 \pm 0,70$
Tenacidade à tração, G_{Ic} (N/mm)	0,20 ^a
Tenacidade ao corte, G_{IIc} (N/mm)	0,38 ^a

^a Valores estimados [13]

3.2.2.3 Araldite® 2015

O adesivo estrutural Araldite® 2015 é igualmente produzido pela empresa *Huntsman Advanced Materials*. Caracteriza-se por ser ligeiramente dúctil, mas com alta resistência ao corte e à clivagem. É um adesivo bi-componente, termoendurecível e de base epóxico. Apresenta-se como uma pasta tixotrópica e a sua cura ocorre à temperatura ambiente. É muito importante efetuar um tratamento de superfície adequado às superfícies a ligar para este tipo de adesivo. A sua resistência e durabilidade são bastante afetadas com tratamentos de superfície inadequados. É necessário remover contaminantes e sujidade dos substratos a ligar.

Campilho et al. [13] através de ensaios de tração em provetes maciços e com a análise das curvas σ - ϵ verificaram o comportamento dúctil do adesivo (Figura 50).

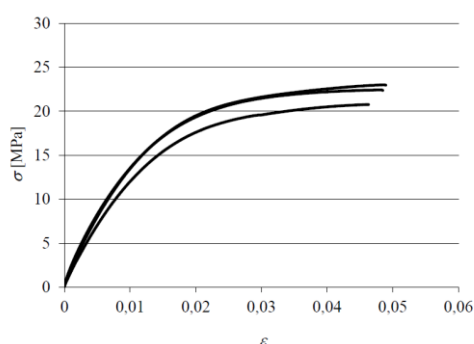


Figura 50 - Curvas σ - ϵ experimentais - Araldite® 2015 [13].

Este adesivo oferece uma resistência à tração e corte inferiores, quando comparado com o Araldite® AV138. Contudo a sua ductilidade permite a redistribuição de tensões nas extremidades da área de ligação devido à existência do efeito de deformação diferencial dos substratos. Na Tabela 8 estão presentes as propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® 2015.

Tabela 8 - Propriedades mecânicas e de fratura do Araldite® 2015 [13, 70, 72].

Propriedade	Valor
Módulo de Young, E (GPa)	$1,85 \pm 0,21$
Coeficiente de Poisson, ν	0,33
Tensão de cedência à tração, σ_e (MPa)	$12,63 \pm 0,61$
Tensão de rotura à tração, σ_f (MPa)	$21,63 \pm 1,61$
Deformação de rotura à tração, ϵ_f (%)	$4,77 \pm 0,21$
Módulo de elasticidade transversal, G (GPa)	$0,56 \pm 0,01$
Tensão de cedência ao corte, τ_y (MPa)	$14,60 \pm 1,30$
Tensão de rotura ao corte, τ_f (MPa)	$17,90 \pm 1,80$
Deformação de rotura ao corte, γ_f (%)	$43,90 \pm 3,40$
Tenacidade à tração, G_{Ic} (N/mm)	$0,43 \pm 0,02$
Tenacidade ao corte, G_{IIc} (N/mm)	$4,70 \pm 0,34$

3.2.2.4 SikaForce® 7752

O adesivo estrutural SikaForce® 7752 é produzido pela empresa Sika. É um adesivo bi-componente com cura à temperatura ambiente, apresenta boa resistência ao impacto e é bastante flexível a baixas temperaturas. Possui elevada resistência ao corte e ao arrancamento, e apresenta uma boa resistência térmica.

É um adesivo à base de poliuretano com um comportamento dúctil, como é possível verificar na análise das curvas σ - ϵ da Figura 51 [73].

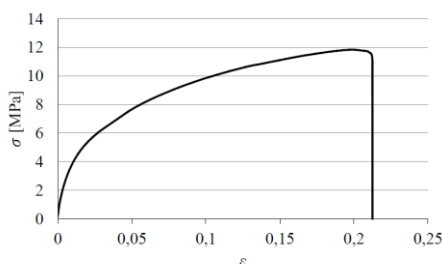


Figura 51 - Curva σ - ϵ experimental - SikaForce® 7752 [73].

Na Tabela 9 estão presentes as propriedades mecânicas e de fratura do adesivo SikaForce® 7752.

Tabela 9 - Propriedades mecânicas e de fratura do SikaForce® 7752 [73].

Propriedade	Valor
Módulo de Young, E (GPa)	$0,49 \pm 0,09$
Coeficiente de Poisson, ν	0,30
Tensão de cedência à tração, σ_e (MPa)	$3,24 \pm 0,48$
Tensão de rotura à tração, σ_f (MPa)	$11,48 \pm 0,25$
Deformação de rotura à tração, ϵ_f (%)	$19,18 \pm 1,40$
Módulo de elasticidade transversal, G (GPa)	$0,19 \pm 0,01$
Tensão de cedência ao corte, τ_y (MPa)	$5,16 \pm 1,14$
Tensão de rotura ao corte, τ_f (MPa)	$10,17 \pm 0,64$
Deformação de rotura ao corte, γ_f (%)	$54,82 \pm 6,38$
Tenacidade à tração, G_{Ic} (N/mm)	$2,36 \pm 0,17$
Tenacidade ao corte, G_{IIc} (N/mm)	$5,41 \pm 0,34$

3.2.3 Condições da análise numérica

O *software* utilizado para a simulação numérica nesta dissertação foi o ABAQUS®. Numa primeira fase, foi construído o modelo base e optou-se por usar condições de simetria vertical com o objetivo de simplificar a sua construção e geometria e assim, conseguir diminuir o esforço computacional. Este procedimento permitiu obter dados mais rapidamente.

Na Figura 52 está representado o primeiro modelo construído, que serviu de ponto de partida para a construção dos outros modelos. Foram considerados modelos bidimensionais, uma vez que a geometria em estudo tem secção constante fora do plano. A geometria dos substratos foi dividida em partições para facilitar a construção da malha de elementos finitos.

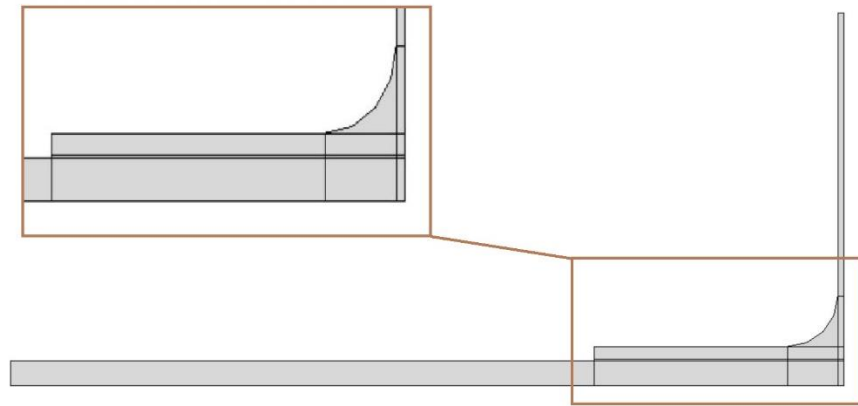


Figura 52 - Modelo numérico com o detalhe das partições para construção da malha.

Após o desenho das juntas foi necessário introduzir os dados de análise nos diferentes módulos presentes no *software*. Todo este processo é descrito e está dividido em sete módulos:

1. *Part*: consiste na execução do desenho da estrutura, incluindo a divisão em partições. Todas as variações de geometria foram feitas neste separador, tais como: a , t , l e r – Figura 53.

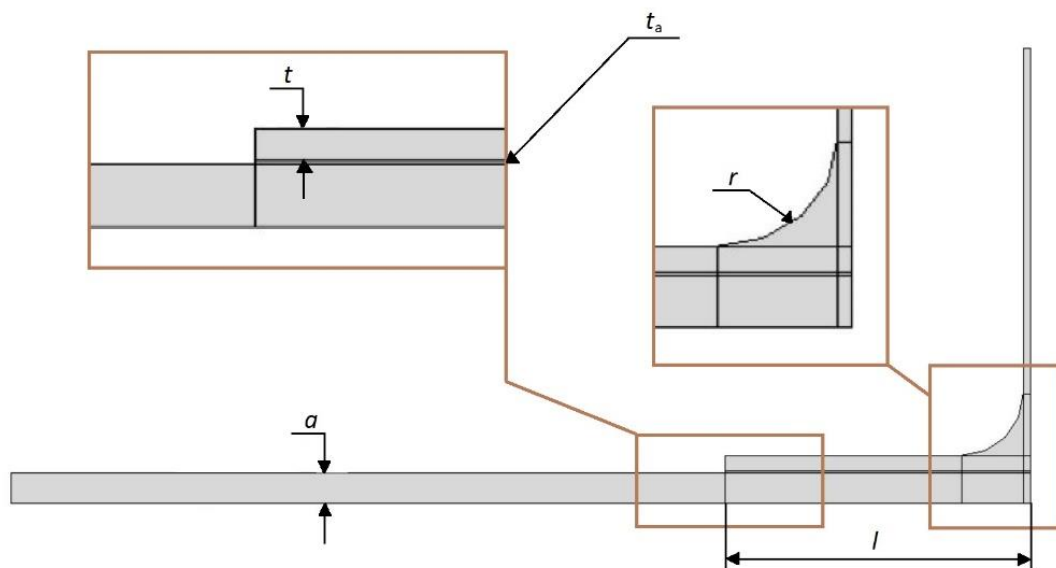


Figura 53 - Imagem do *software* ABAQUS® com as partições definidas e a representação dos parâmetros.

2. *Property*: consiste na atribuição das diferentes propriedades a cada partição da estrutura desenhada no separador 1, para a liga de alumínio e para cada adesivo.

Foi considerada uma secção do tipo coesiva e com propriedades coesivas para a partição correspondente à camada de adesivo de 0,2 mm de espessura. Para a liga de alumínio considerou-se um modelo sólido e homogêneo.

3. *Load*: neste módulo foram introduzidas as condições fronteira. Na Figura 54 estão representadas as diferentes condições existentes neste estudo. Na extremidade esquerda da base, o modelo encontra-se encastrado. No eixo de simetria da junta, foi aplicada uma condição de simetria vertical e foi aplicado um deslocamento de tração na extremidade superior da junta T.

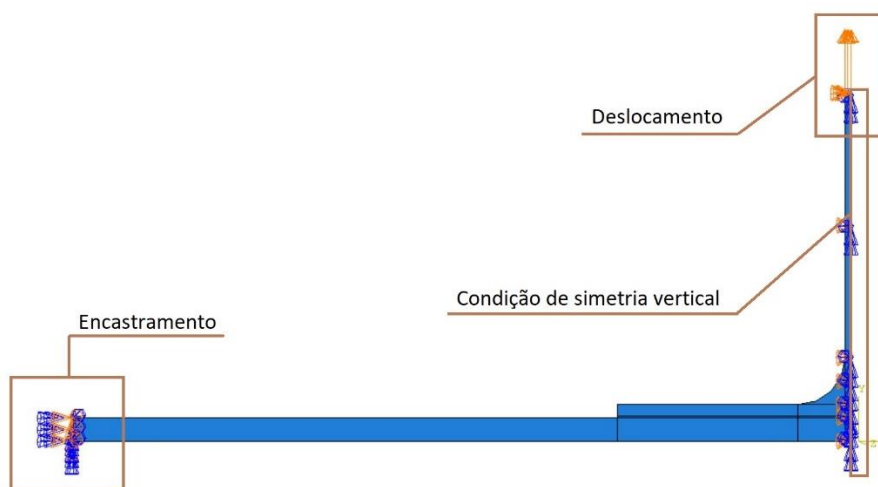


Figura 54 - Esquema representativo das condições fronteira.

4. *Step*: neste módulo é inserido o número máximo de incrementos que o modelo pode conter e o tamanho inicial, mínimo e máximo.

A incrementação é bastante importante na construção do modelo, uma vez que o limite superior de incrementos na análise deve ser o suficiente para que esta não termine devido ao número de insuficiente de incrementos. Na Figura 55 são referidos os valores utilizados na incrementação.

Type:	<input checked="" type="radio"/> Automatic	<input type="radio"/> Fixed	
Maximum number of increments:	10000		
Increment size:	Initial	Minimum	Maximum
	0.01	1E-020	0.01

Figura 55 - Valores de incrementação no *software* ABAQUS®.

5. *Mesh*: neste módulo foi feita a discretização da malha, após definição dos tamanhos de malha em cada aresta do modelo.

Na análise de resistência (Figura 56), foi utilizada uma malha menos refinada em comparação com a utilizada na análise de tensões. O objetivo foi reduzir o esforço computacional associado sem comprometer a validade dos resultados.

No caso da liga de alumínio, foram selecionadas todas as partições correspondentes e foi definido *plain strain* como tipo de elemento e com viscosidade 1E-05. Para o adesivo foi definido o elemento *cohesive* e com a mesma viscosidade.

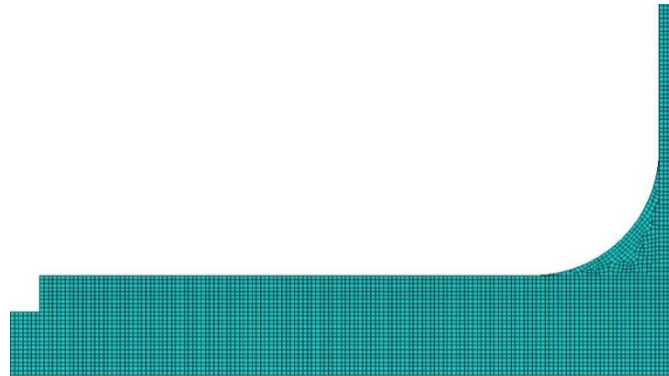


Figura 56 - Malha refinada para a análise da resistência.

A malha usada para a análise de tensões foi mais refinada do que a malha usada para a análise de resistência. O objetivo foi captar os grandes gradientes de tensões ao longo do adesivo. A malha da Figura 57 é cerca de 10 vezes mais refinada em comparação com a malha usada para a análise de resistência.

No caso da liga de alumínio, foram selecionadas todas as partições correspondentes e foi definido *plain strain* como tipo de elemento e com viscosidade 1E-05. Para o adesivo manteve-se o mesmo tipo de elemento usado na liga de alumínio.

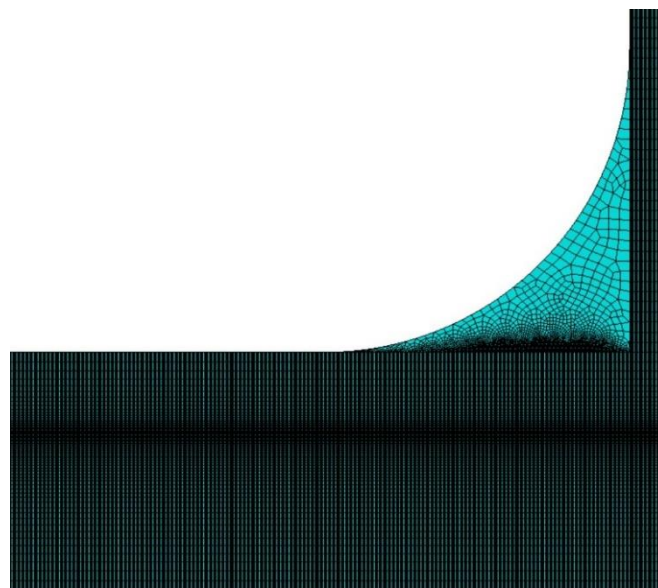


Figura 57 - Malha refinada para a análise de tensões.

6. *Job*: neste módulo foram realizados os testes dos modelos. Para o modelo de análise de resistência, todos os testes decorrem até ao fim do deslocamento imposto, para que ocorra a rotura total da estrutura.

Para o modelo de análise de tensões foi apenas necessário atingir um incremento, uma vez que se pretendia extrair as tensões no domínio elástico do carregamento.

7. *“Visualization”*: este módulo permitiu acompanhar e monitorizar o comportamento da estrutura quando solicitada à tensão e permitiu extrair as curvas σ - ϵ , a variável de dano e a análise de tensões.

3.2.4 Modelo de dano coesivo

Conforme já referido, os MDC baseiam-se numa relação entre tensões e deslocamentos que se ligam nós homólogos dos elementos coesivos, e desta forma, simulam o comportamento elástico de um material até à resistência máxima e posterior degradação das propriedades dos materiais até à rotura [74]. Existem vários MDC, aplicados em diferentes casos, conforme o comportamento dos materiais em causa ou das suas interfaces a serem simuladas [49], como por exemplo, o modelo linear parabólico [45], triangular [44], exponencial [46], polinomial [47] e trapezoidal [48] de forma a obter resultados mais precisos.

Porém, a lei triangular é a mais utilizada devido a ser de uso mais simples, pelo pequeno número de parâmetros a serem determinados e também pelos resultados precisos para grande parte das condições reais [50]. Trata-se de um modelo coesivo baseado em MEF de interface [51] de quatro nós e espessura nula, conciliáveis com os elementos sólidos bidimensionais de quatro nós do ABAQUS®. Neste tipo de modelo de dano são mostradas duas versões distintas: modo puro e modo misto (Figura 58).

O modo puro caracteriza-se pelo facto de a propagação do dano acontecer num conjunto particular de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respetivo forem anulados na lei coesiva. O modo misto usa critérios energéticos e de tensões para conjugar os modos puros de tração e de corte [53]. Neste modo, os elementos coesivos estão sujeitos a duas componentes, a normal de deformação e a relativa à deformação de corte, sendo que são determinadas através de uma análise cinemática do elemento. É necessário salientar que, em camadas finas entre substratos rígidos, as tensões de membrana não são consideradas.

Antes da presença de dano, a relação entre tensões e deformações é definida pela matriz \mathbf{K}_{COH} , que relaciona as tensões e deformações em tração e corte através de elementos coesivos. Esta matriz é definida como apresentado em (1) [67].

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{nn} & k_{ns} \\ k_{sn} & k_{ss} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \epsilon_n \\ \epsilon_s \end{Bmatrix} = \mathbf{K}_{COH} \times \boldsymbol{\epsilon}. \quad (1)$$

A matriz K_{COH} abrange os parâmetros que definem a rigidez da ligação adesiva. No caso particular, em que é usada uma formulação local para simular fraturas numa espessura nula, os parâmetros da matriz têm valores muito elevados, com o objetivo de não gerar deformações na estrutura induzidas pela presença dos elementos coesivos [67]. No caso de uma formulação contínua de camadas finas, particularmente para ligações adesivas, têm-se uma aproximação fiável aos parâmetros de rigidez admitindo $k_{nn}=E$, $k_{ss}=G$ e $k_{ns}=0$, em que E corresponde ao módulo de elasticidade longitudinal e G ao módulo de elasticidade transversal. Então, ao considerar estes parâmetros, o modelo ilustra de forma correta a deformação da camada de adesivo [53].

Na lei em modo misto (2), o início do dano pode ser definido por diferentes critérios, sendo o mais usado, o critério quadrático de tensões [67]

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 = 1, \quad (2)$$

onde “<” são os parênteses de *Macaulay*, que designam que uma tensão de compressão não provoca dano. Este critério é reconhecido pela sua exatidão, como referido noutros trabalhos [75]. Quando t_m^0 é atingido (Figura 58), através da expressão (2), a rigidez do material começa a sofrer um processo de amaciamento. A separação completa de um par de nós homólogos (Figura 58) é prevista por um critério linear energético, em função de G_{IC} e G_{IIC} (3).

$$\frac{G_I}{G_{IC}} + \frac{G_{II}}{G_{IIC}} = 1. \quad (3)$$

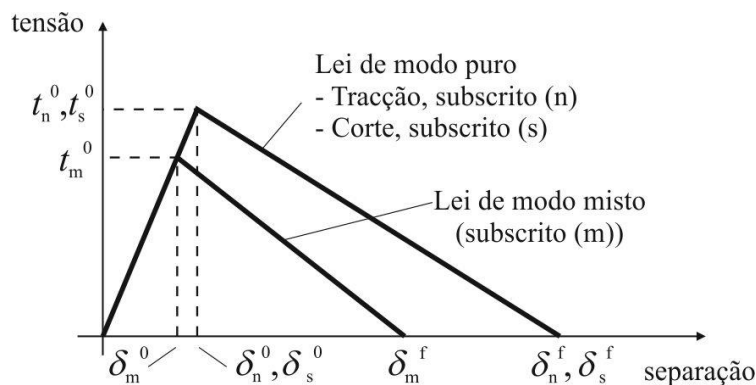


Figura 58 - Modelo adesivo triangular [51, 52].

Usando o método enunciado, é possível estudar a variável do dano ao longo da junta adesiva. Um dos parâmetros para este estudo é o *stiffness degradation* (SDEG). Este parâmetro revela a degradação dum elemento coesivo entre 0 e 1, sendo 0 o valor para quando não existe dano no elemento e 1 para quando ocorre a rotura total. Os valores de SDEG definem de forma percentual a plastificação do adesivo, sendo que se o valor de SDEG do adesivo estiver compreendido entre 0 e 1, então este encontra-se em processo de amaciamento.

3.2.5 Leis coesivas para simulação do adesivo

Para caracterizar as leis coesivas em tração e corte, é necessário obter os valores de t_n^0 , t_s^0 , G_{Ic} e G_{IIc} .

Para o adesivo Araldite® AV138, Campilho et al. [76], utilizaram os valores de resistência à tração e corte através de ensaios a adesivo maciço e ensaios de corte *Thick Adherend Shear Test* (TAST) para definir os valores de t_n^0 e t_s^0 . Foram então utilizados estes valores para a construir leis coesivas aproximadas, e para isso, utilizaram-se valores de G_{Ic} e G_{IIc} de adesivos tipicamente frágeis. Os valores de E e G foram determinados experimentalmente com ensaios TAST.

No caso do adesivo Araldite® 2015, de Moura et al. [54] determinaram as leis coesivas da camada de adesivo por um método inverso para a determinação a determinação dos valores de t_n^0 e t_s^0 . Esta técnica consiste na determinação de G_{Ic} e G_{IIc} através de ensaios *Double-cantilever beam* (DCB) e *End-notched flexure* (ENF). Os valores determinados permitem a construção de uma lei coesiva no modo puro que, inicialmente, tem valores aproximados de t_n^0 e t_s^0 em função do tipo de adesivo. Os valores de t_n^0 e t_s^0 são então definidos utilizando um procedimento de ajuste entre as curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais do teste respetivo de caracterização à fratura. Os valores de E e G , foram determinados experimentalmente com ensaios de adesivo maciço e ensaios de corte (TAST), respetivamente [76].

Finalmente, no caso do adesivo SikaForce® 7752, para determinar a lei coesiva ao corte foi utilizado o método inverso. A determinação do valor de G_{IIc} foi levado a cabo por ensaio de fratura ENF e valor de t_s^0 foi obtido por estimativa através de um processo iterativo [77]. de Moura et al. [54] obtiveram o valor de t_n^0 aproximado ao valor médio de resistência à tração de provetes maciços ensaiados neste trabalho. Os valores de E e G foram obtidos experimentalmente com ensaios de adesivo maciço e ensaios de corte (TAST) [73].

A Tabela 10 mostra os valores de t_n^0 , t_s^0 , G_{Ic} e G_{IIc} utilizados na simulação numérica para cada tipo de adesivo.

Tabela 10 - Parâmetros coesivos em tração e corte para os três adesivos.

Adesivo	E (MPa)	G (MPa)	t_n^0 (MPa)	t_s^0 (MPa)	G_{Ic} (N/mm)	G_{IIc} (N/mm)
Araldite® AV138	4890	1560	39,45	30,20	0,20	0,38
Araldite® 2015	1850	560	21,63	17,9	0,43	4,70
SikaForce® 7752	490	190	11,48	10,17	2,36	5,41

3.2.6 Análise de tensões na junta

Com o objetivo de obter a distribuição de tensões de arrancamento e corte (σ_y e τ_{xy}) em diversos pontos da camada adesiva considerou-se o *software* ABAQUS®. Foi considerado o mesmo deslocamento aplicado no domínio elástico das juntas.

Nos gráficos que vão ser apresentados neste capítulo, no eixo das ordenadas estão representadas as tensões σ_y e τ_{xy} normalizadas ($\sigma_y/\sigma_{méd}$ e $\tau_{xy}/\sigma_{méd}$, respectivamente). A $\sigma_{méd}$ representa a média de σ_y ao longo da camada do adesivo. No eixo das abcissas foi considerado o comprimento normalizado x/l , que foi obtido dividindo a posição da camada de adesivo pelo comprimento total.

Através da análise da Figura 59, é possível observar que o ponto $x/l=0$ representa a extremidade livre da sobreposição. O ponto $x/l=1$ representa o lado oposto. Para a geometria base, o ponto $x/l \simeq 0,8$ representa o início do raio do T. Será na zona $x/l=0$ e $x/l \simeq 0,8$ que se prevê uma grande concentração de tensões.

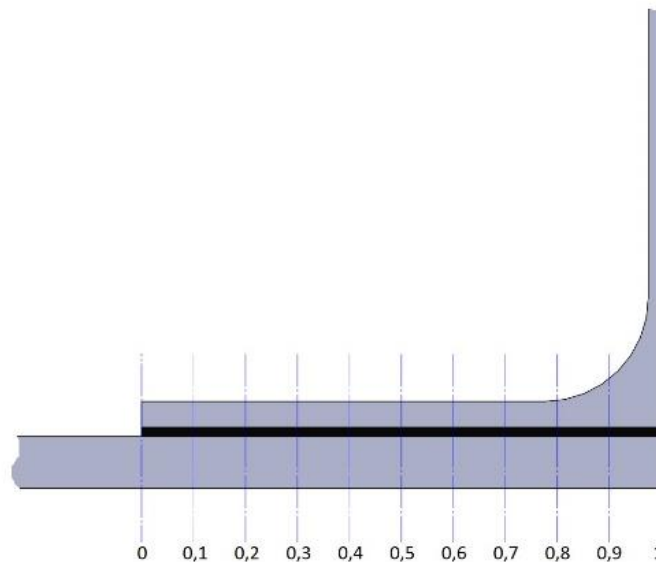


Figura 59 – Representação do comprimento normalizado x/l na junta T.

3.2.6.1 Tensões de arrancamento

A análise das tensões σ_y para os três adesivos é feita para as quatro variáveis geométricas da junta. Esta análise consiste no estudo de $\sigma_y/\sigma_{méd}$ ao longo de x/l , a meio de t_a .

3.2.6.1.1 Espessura da base

Na Figura 60, Figura 61 e Figura 62 estão representadas as tensões de arrancamento para as diferentes espessuras da base (a) para cada um dos três adesivos em estudo (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, respectivamente).

Verifica-se que as tensões σ_y são máximas no ponto $x/l=0$, o que ocorre devido à elevada rigidez do T, que não acompanha a deformação transversal da base. Como tal, geram-se elevadas tensões σ_y na extremidade do adesivo. No ponto $x/l=0,8$ há um pequeno aumento de tensão no início do raio, causado pela diferença de rigidez dos componentes, mas que é insignificante. Também é possível verificar que a diminuição do parâmetro a aumenta significativamente o valor de $\sigma_y/\sigma_{méd}$ em $x/l=0$. Esta diferença ocorre devido ao respetivo aumento de flexibilidade da base, que concentra as tensões σ_y numa mais reduzida com a diminuição de a .

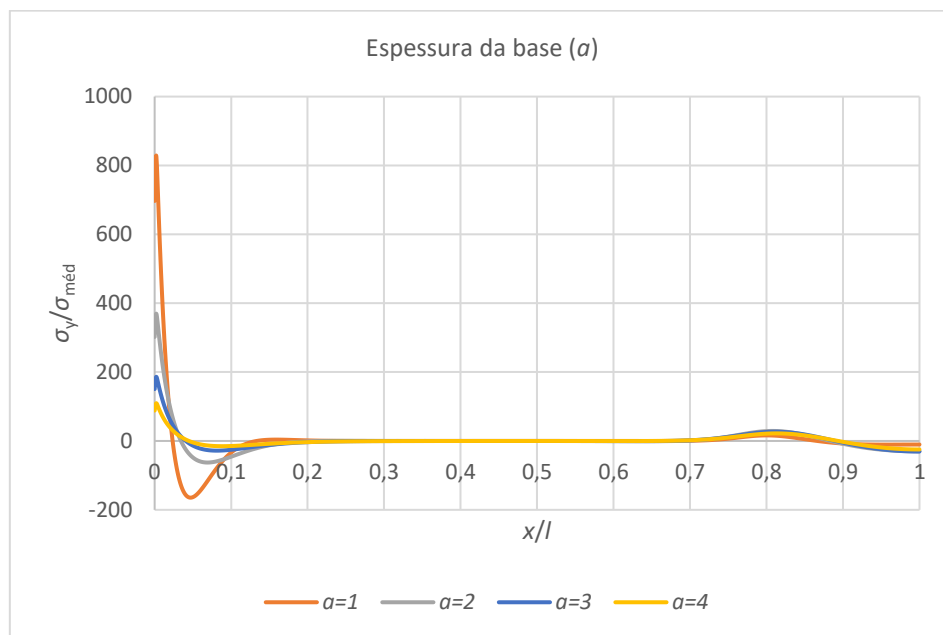


Figura 60 – Tensões $\sigma_y/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de a (Araldite® AV138).

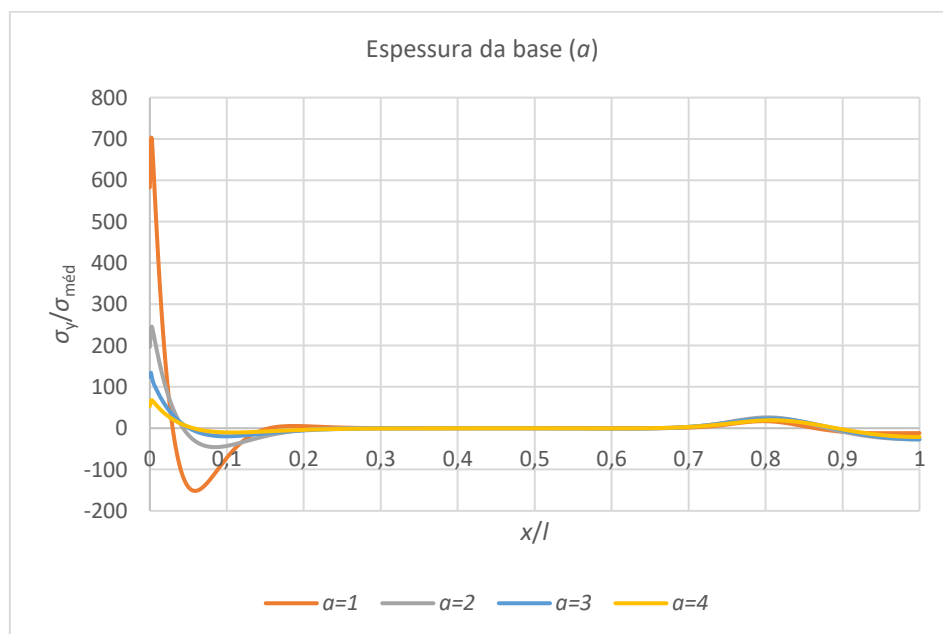


Figura 61 – Tensões $\sigma_y/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de a (Araldite® 2015).

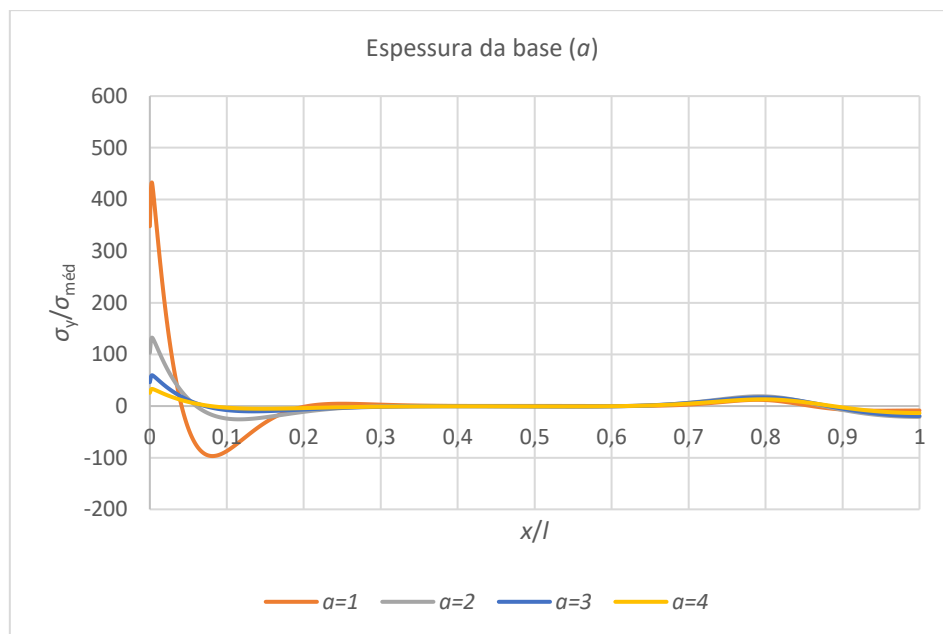


Figura 62 - Tensões $\sigma_y/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de a (SikaForce® 7752).

As juntas que utilizam o Araldite® AV138 registraram o maior pico de tensão σ_y normalizada (829,9), que foi maior cerca de 17,8% em comparação com o Araldite® 2015 e maior cerca de 91,4% em comparação com o SikaForce® 7752. Esta diferença pode ser justificada pela rigidez dos diferentes adesivos, sendo que adesivos mais rígidos provocam naturalmente maiores picos e gradientes de tensões. Desta forma, a variação de rigidez para as juntas ligadas com os três adesivos segue a tendência evidenciada na Tabela 10 relativamente aos valores de E .

3.2.6.1.2 Espessura do T

Na Figura 63, Figura 64 e Figura 65 estão representadas as tensões de arrancamento para as diferentes espessuras do T (t) para os três adesivos. Verifica-se que as tensões são máximas no ponto $x/l=0$, da mesma forma referida no estudo do efeito de a . Com o aumento da espessura do T, entre 0,5 e 2,5 mm, as tensões σ_y em $x/l=0$ aumentam de uma forma progressiva. O efeito observado tem alguma semelhança ao mencionado para o estudo de a , na medida em que valores de t mais elevados propiciam a redução da deformação do T, que contrasta com a deformação transversa da base numa zona localizada na extremidade do adesivo. Por outro lado, em $x/l \approx 0,8$ há um aumento de tensão σ_y na zona do raio, cujo efeito é mais pronunciado com a redução de t . Esta variação está relacionada com a maior deformabilidade do T na zona do raio de concordância, o que acentua o efeito de concentração de tensões σ_y .

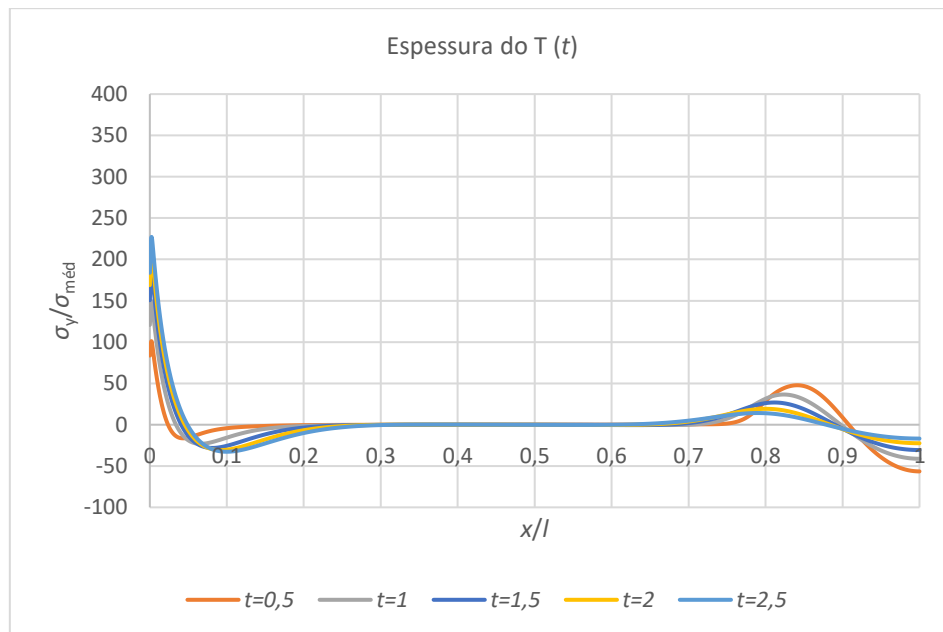


Figura 63 - Tensões $\sigma_y/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de t (Araldite® AV138).

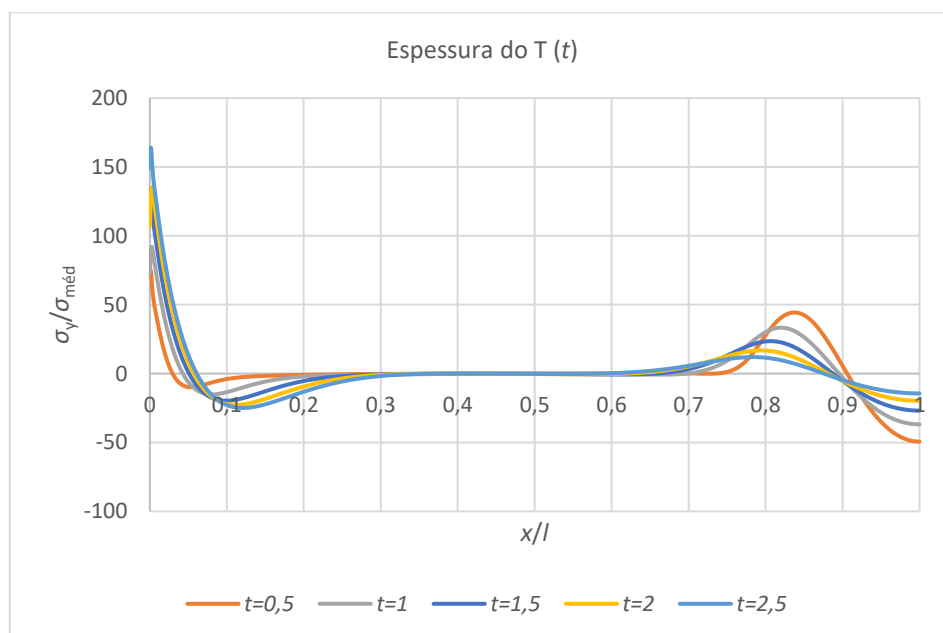


Figura 64 - Tensões $\sigma_y/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de t (Araldite® 2015).

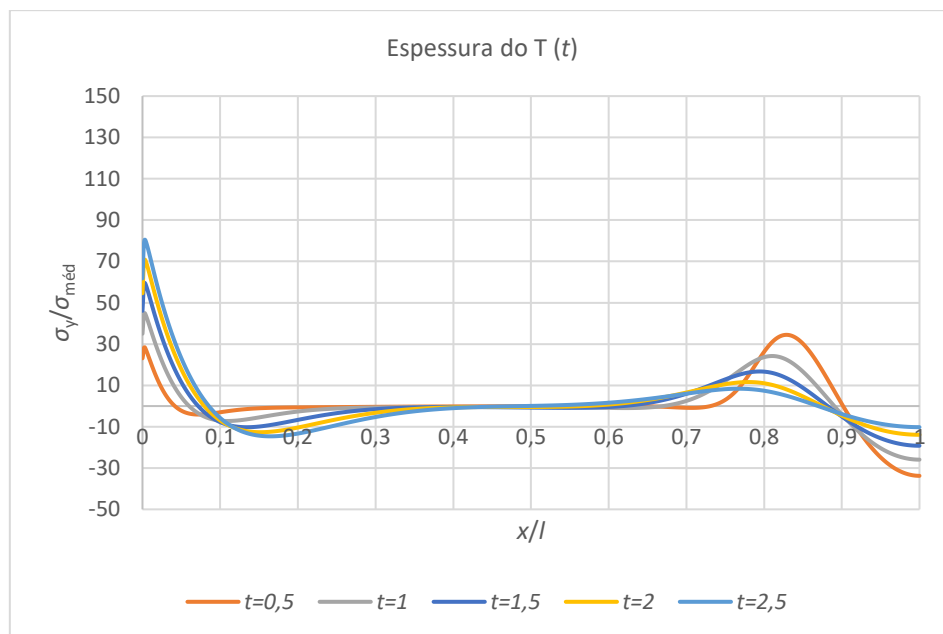
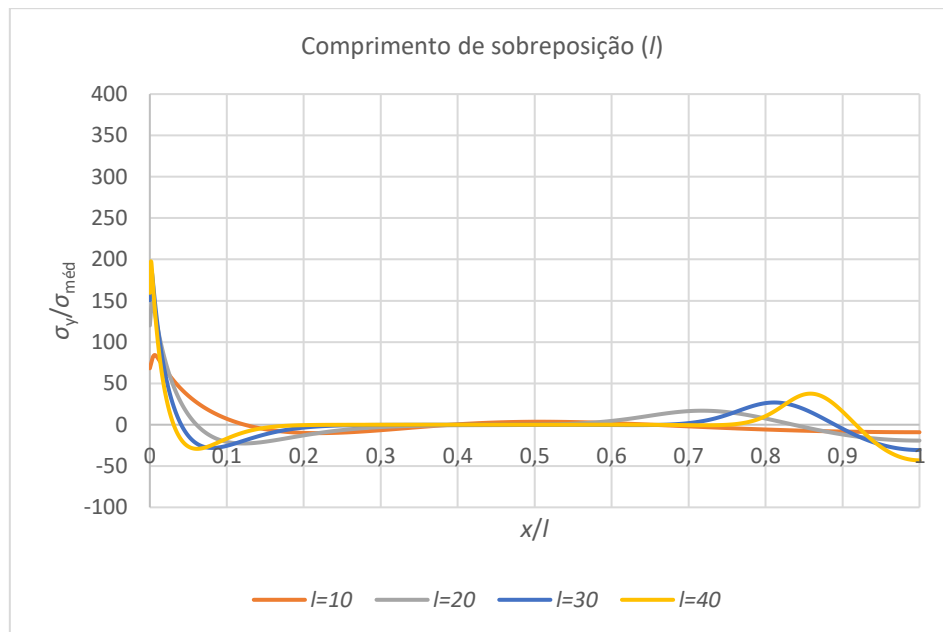
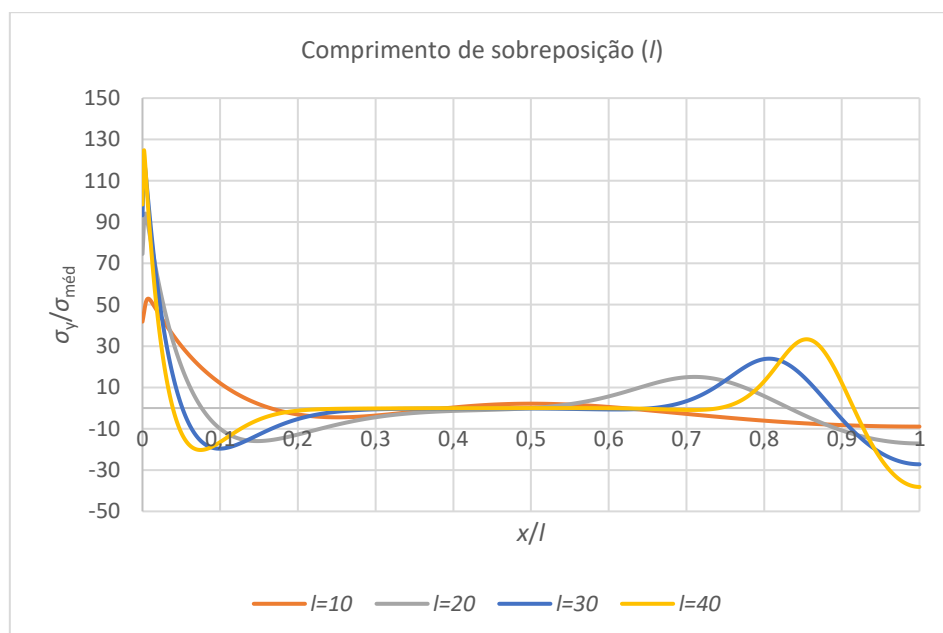


Figura 65 - Tensões $\sigma_y/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de t (SikaForce® 7752).

As juntas que utilizam o Araldite® AV138 registaram o maior pico de tensão (227,1), que foi maior cerca de 38,4% em comparação com o Araldite® 2015 e maior cerca de 182,2% em comparação com o SikaForce® 7752. O efeito observado deve-se ao já referido no estudo de α , no que concerne à diferente rigidez entre adesivos.

3.2.6.1.3 Comprimento de sobreposição

Na Figura 66, Figura 67 e Figura 68 estão representadas as tensões de arrancamento para os diferentes adesivos em função de l . Verifica-se que as tensões são máximas no ponto $x/l=0$. No seguimento das análises anteriores, a deformação dos diferentes componentes da junta, nomeadamente a flexão da base, combinada com a rigidez do T, provocam uma concentração de tensões σ_y na extremidade do adesivo independentemente do valor de l . Com o aumento de l , aumentam as tensões σ_y normalizadas em $x/l=0$. Este facto é devido ao aumento da área ligada, que aumenta as deformações da base na extremidade do adesivo, o que se traduz num pico de tensões σ_y superior. Por outro lado, o aumento de uma zona com tensões σ_y aproximadamente nulas também contribui para a diminuição de $\sigma_{méd}$, o que aumenta o rácio de tensão normalizada. Na zona limite do raio de concordância observa-se um aumento de tensões σ_y com o aumento de l , que também se considera estar ligado ao efeito de redução de $\sigma_{méd}$.

Figura 66 - Tensões $\sigma_y/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de l (Araldite® AV138).Figura 67 - Tensões $\sigma_y/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de l (Araldite® 2015).

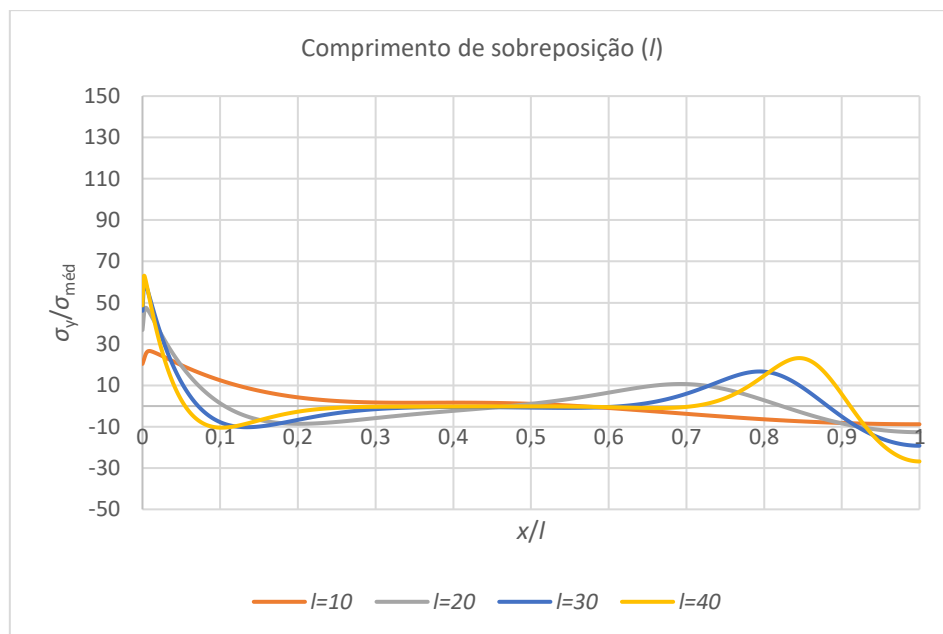


Figura 68 - Tensões $\sigma_y/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de l (SikaForce® 7752).

As juntas que utilizam o Araldite® AV138 também registaram o maior pico de tensão em $x/l=0$ (197,7), que foi maior cerca de 58,4% em comparação com o Araldite® 2015 e maior cerca de 213,5% em comparação com o SikaForce® 7752. A diferença observada está naturalmente relacionada com a diferente rigidez dos adesivos.

3.2.6.1.4 Raio do T

Na Figura 69, Figura 70 e Figura 71 estão representadas as tensões σ_y para os diferentes adesivos, em função dos valores escolhidos para r . Verifica-se que as tensões σ_y são máximas no ponto $x/l=0$, em concordância com as diferentes geometrias anteriores. Também é possível verificar que a variação de r não altera as tensões σ_y nesse ponto, uma vez que há variação de geometria na referida zona, que afete as deformações circundantes à camada de adesivo. Como a geometria na zona livre da junta é igual, era esperado que não houvesse alterações nas tensões no ponto $x/l=0$. No entanto, há um aumento de tensão σ_y na zona de início do raio e que é gerada em pontos x/l diferentes consoante a geometria do raio. De facto, para um valor de r maior, a tensão gerada inicia-se numa zona mais à esquerda de x/l . Verificou-se que o pico de tensão σ_y devido a este efeito geométrico ocorre aproximadamente na transição entre o raio e a zona reta do T.

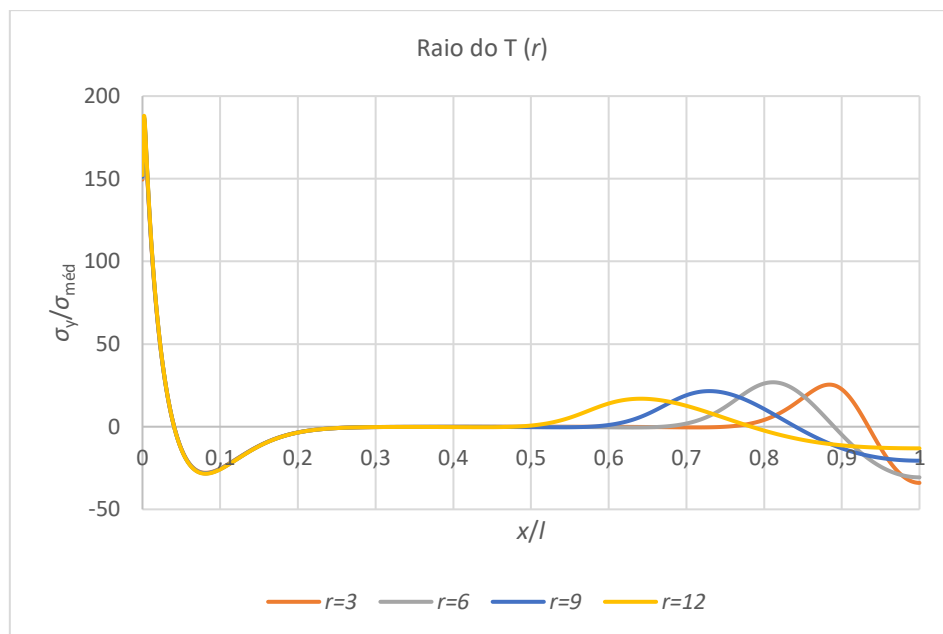


Figura 69 - Tensões $\sigma_y/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de r (Araldite® AV138).

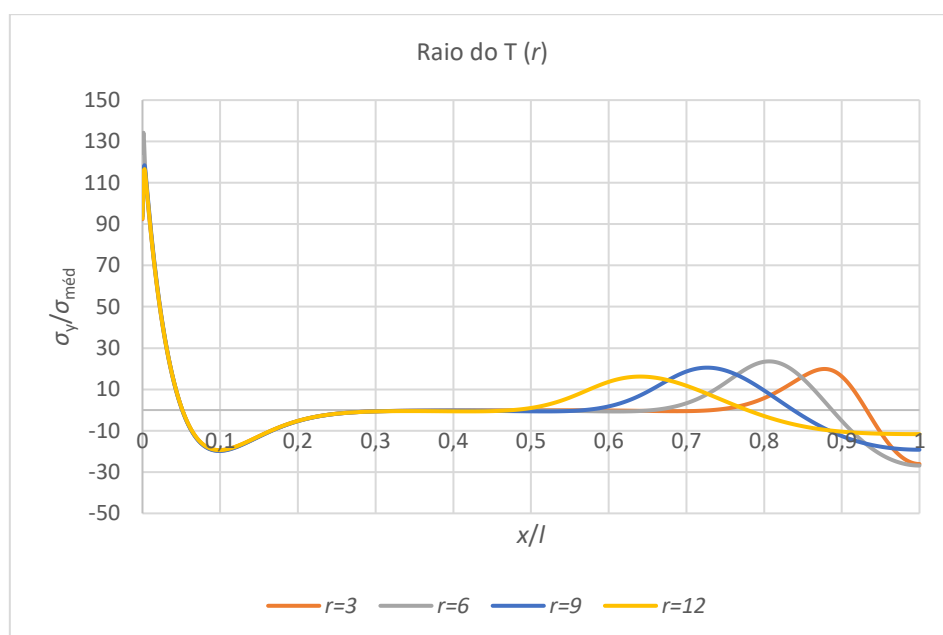


Figura 70 - Tensões $\sigma_y/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de r (Araldite® 2015).

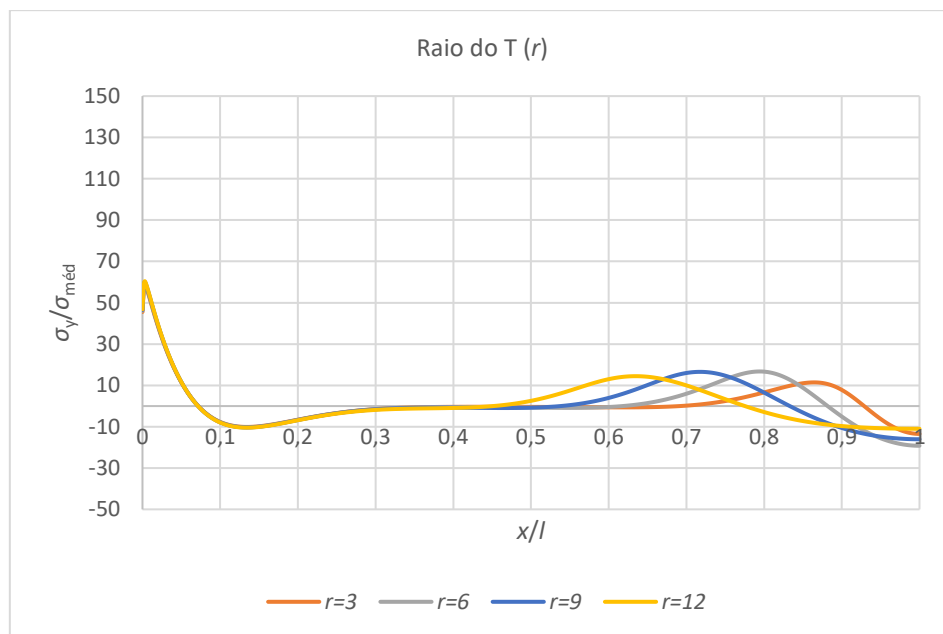


Figura 71 - Tensões $\sigma_y/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de r (SikaForce® 7752).

As juntas que utilizam o Araldite® AV138 registraram o maior pico de tensão σ_y normalizada em $x/l=0$ (188,1), que foi maior cerca de 40,1% em comparação com o Araldite® 2015 e maior cerca de 211,4% em comparação com o SikaForce® 7752. A justificação é idêntica à apresentada para as análises geométricas anteriores.

3.2.6.2 Tensões de corte

A análise das tensões τ_{xy} para os três adesivos é feita para as quatro variáveis geométricas da junta. Esta análise consiste no estudo de $\tau_{xy}/\sigma_{méd}$ ao longo de x/l .

3.2.6.2.1 Espessura da base

Na Figura 72, Figura 73 e Figura 74 estão representadas as tensões τ_{xy} normalizadas para as diferentes espessuras da base (a) para cada um dos três adesivos em estudo (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, respetivamente).

Verifica-se que as tensões τ_{xy} são máximas no ponto $x/l=0$, ponto onde há uma maior concentração de tensões, devido ao deslizamento de corte entre a base e o T ser máximo em virtude de as deformações dos componentes da junta serem superiores nesta zona. No ponto $x/l \approx 0,8$ há um pequeno aumento de tensão no início do raio, que é insignificante relativamente ao valor máximo na camada de adesivo, e que ocorre devido à variação de rigidez entre componentes contíguos adjacentes à camada de adesivo. Também é possível verificar que a diminuição de a faz aumentar significativamente $\tau_{xy}/\sigma_{méd}$ na proximidade de $x/l=0$, o que ocorre devido à diminuição de rigidez da base, o que por sua vez aumenta a sua deformação transversal e acentua os efeitos de corte nesta zona.

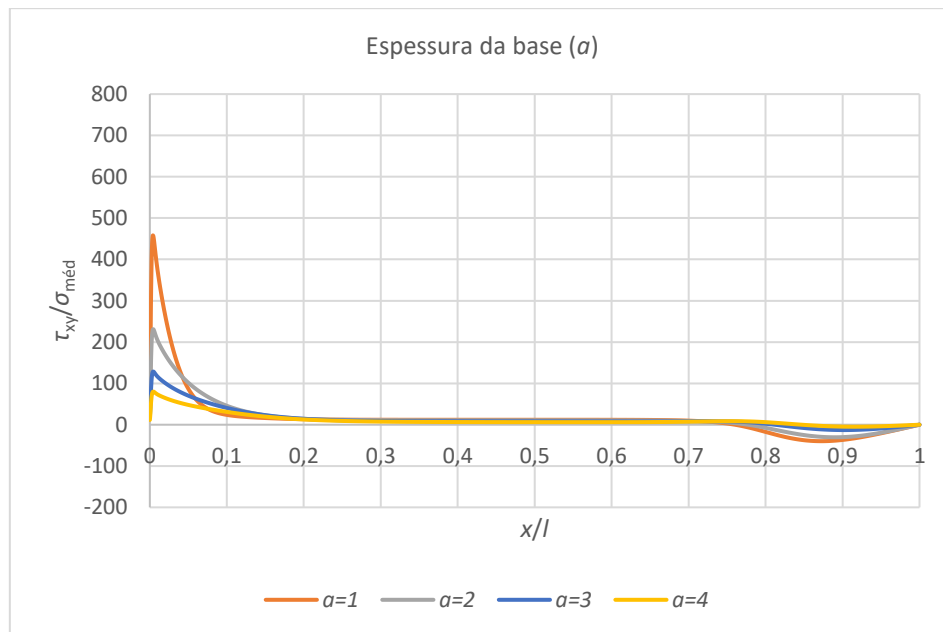


Figura 72 - Tensões $\tau_{xy}/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de a (Araldite® AV138).

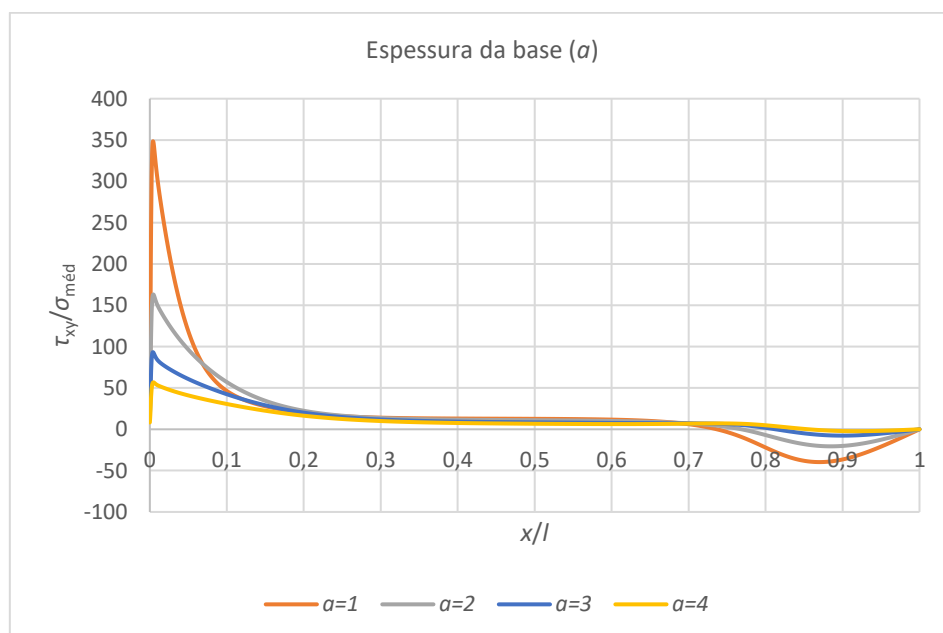


Figura 73 - Tensões $\tau_{xy}/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de a (Araldite® 2015).

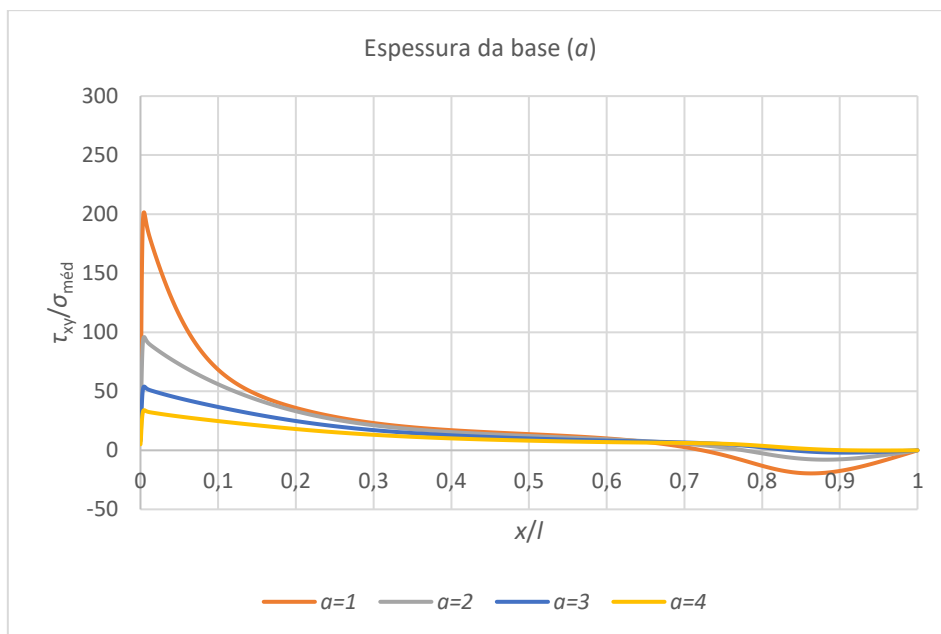


Figura 74 - Tensões $\tau_{xy}/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de a (SikaForce® 7752).

As juntas que utilizam o Araldite® AV138 registaram o maior pico de tensão τ_{xy} normalizado (458,2), que foi maior cerca de 31,5% em comparação com o Araldite® 2015 e maior cerca de 127,3% em comparação com o SikaForce® 7752. Esta diferença pode ser justificada também pela rigidez dos diferentes adesivos, na medida em que as concentrações de tensões aumentam com este parâmetro.

3.2.6.2.2 Espessura do T

Na Figura 75, Figura 76 e Figura 77 estão representadas as tensões τ_{xy} normalizadas para as diferentes espessuras do T (t) para cada um dos três adesivos em estudo (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, respetivamente).

Verifica-se que as tensões τ_{xy} são máximas no ponto $x/l=0$. Verifica-se também que as tensões de corte máximas apresentam valores muito semelhantes entre 1 e 2,5 mm. Este efeito está relacionado com o aumento da rigidez do T, que faz aumentar as tensões τ_{xy} no ponto $x/l=0$, devido ao T não conseguir acompanhar a deformação transversa da base. Devido à grande flexibilidade do T com $t=0,5$ mm, observa-se uma grande diferença para as restantes geometrias. Por outro lado, no ponto $x/l \simeq 0,8$ há um aumento das tensões $\tau_{xy}/\sigma_{méd}$ na zona do raio, que é maior quanto menor for a espessura do T. Observa-se precisamente o oposto em comparação com $x/l=0$. Este facto deve-se a um aumento da deformabilidade do T nessa zona, que faz aumentar a concentração de tensões τ_{xy} .

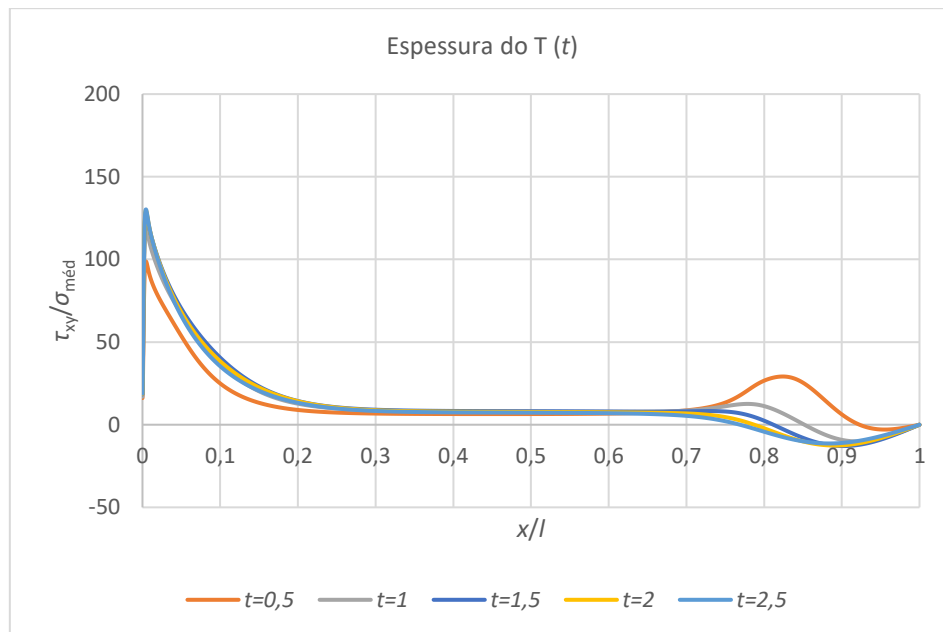


Figura 75 - Tensões $\tau_{xy}/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de t (Araldite® AV138).

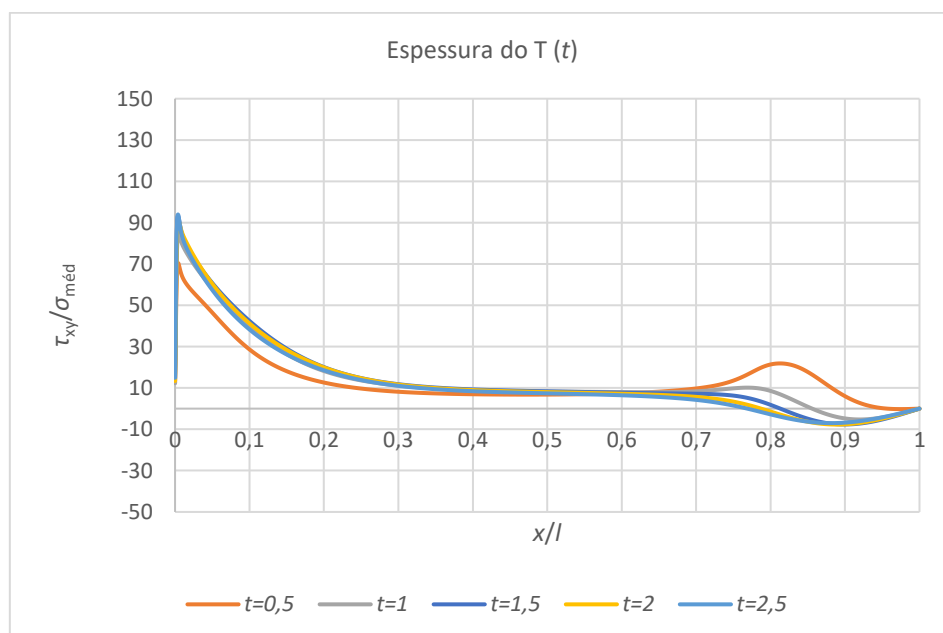


Figura 76 - Tensões $\tau_{xy}/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de t (Araldite® 2015).

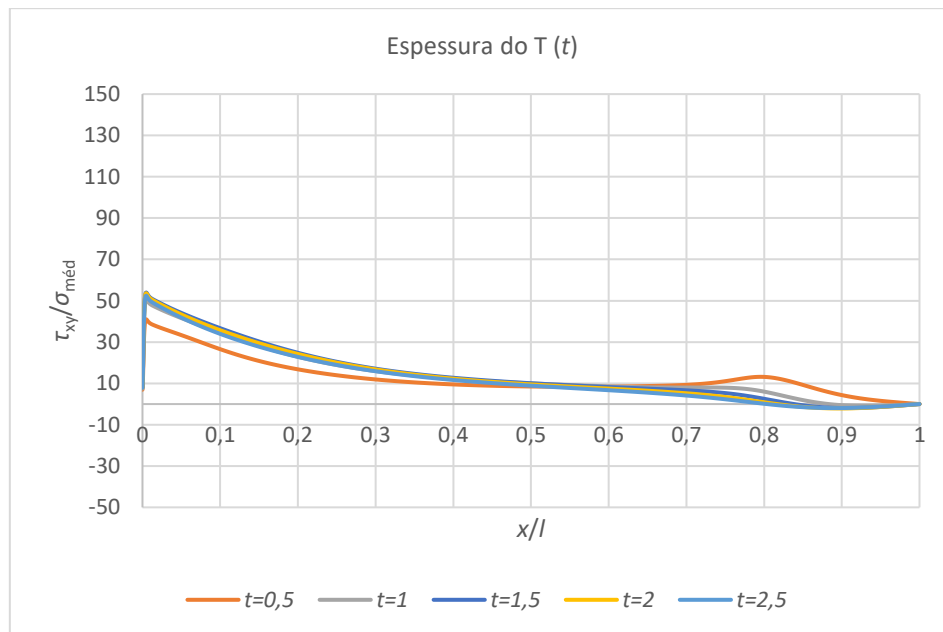


Figura 77 - Tensões $\tau_{xy}/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de t (SikaForce® 7752).

As juntas que utilizam o Araldite® AV138 registaram o maior pico de tensão (130,2), que foi maior cerca de 38,5% em comparação com o Araldite® 2015 e maior cerca de 148,2% em comparação com o SikaForce® 7752. Este efeito observado, deve-se naturalmente à diferença na rigidez dos adesivos.

3.2.6.2.3 Comprimento de sobreposição

Na Figura 78, Figura 79 e Figura 80 estão representadas as tensões τ_{xy} normalizadas para os diferentes comprimentos de sobreposição (l) para cada um dos três adesivos em estudo (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, respetivamente).

Verifica-se que as tensões são máximas no ponto $x/l=0$. Conforme referido anteriormente, este pico de tensões ocorre devido ao deslizamento de corte entre substratos. No ponto $x/l \approx 0,8$ também há um aumento de tensão $\tau_{xy}/\sigma_{méd}$ na zona do raio, devido à variação de rigidez na zona do raio do T. Verifica-se também que o aumento de l faz aumentar as tensões τ_{xy} em $x/l=0$. Este facto é devido ao aumento da zona ligada, o que provoca uma concentração maior de esforços na extremidade da camada do adesivo, enquanto a zona central se encontra com esforços praticamente nulos, o que naturalmente diminui $\sigma_{méd}$ e aumenta o valor de pico de $\tau_{xy}/\sigma_{méd}$ em $x/l=0$.

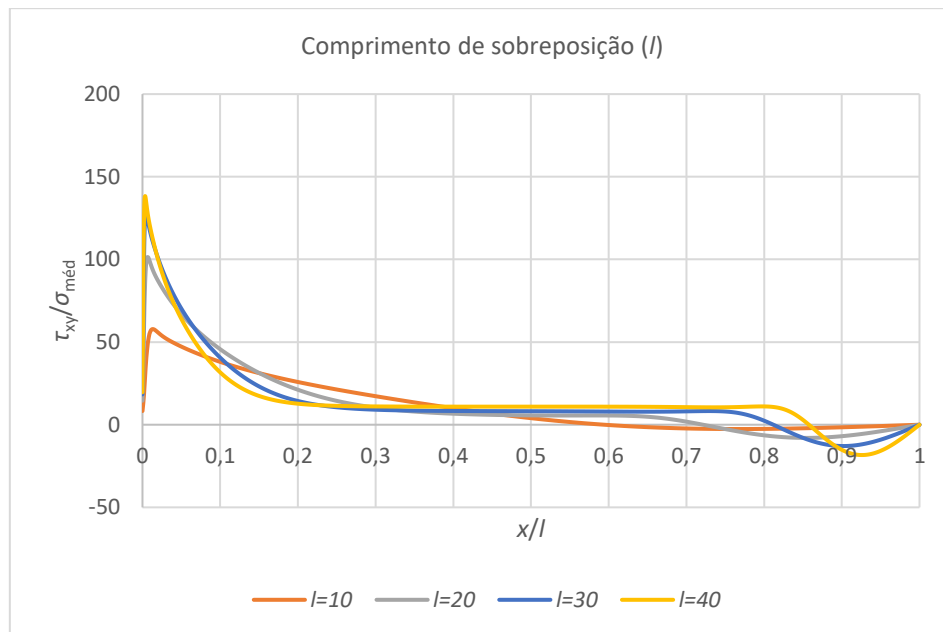


Figura 78 - Tensões $\tau_{xy}/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de l (Araldite® AV138).

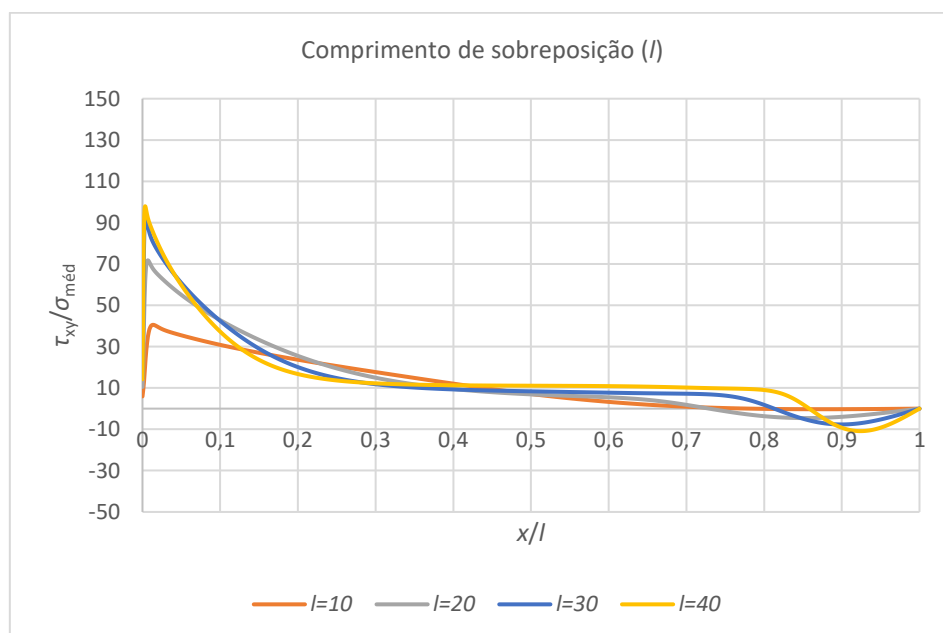


Figura 79 - Tensões $\tau_{xy}/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de l (Araldite® 2015).

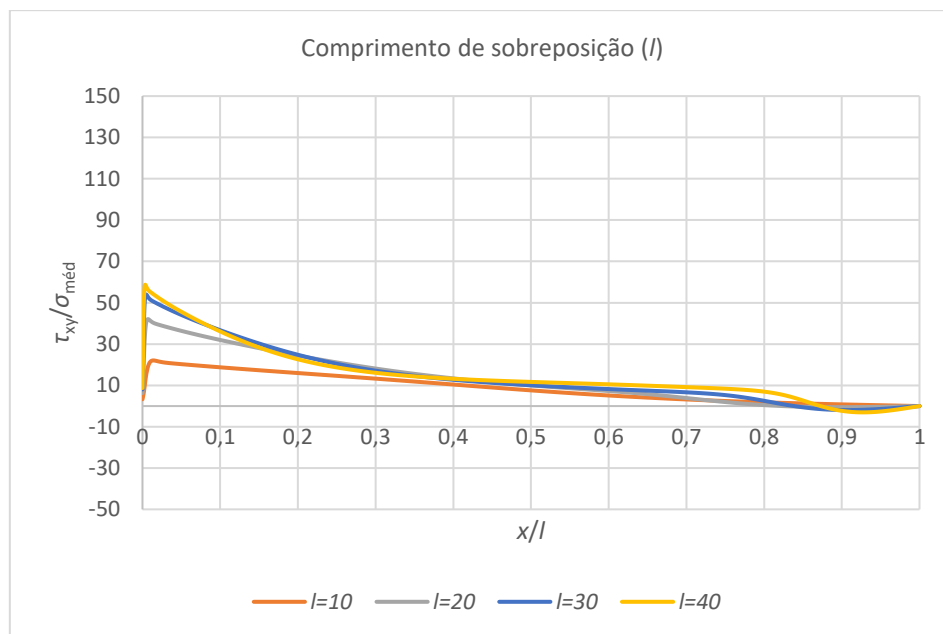


Figura 80 - Tensões $\tau_{xy}/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de l (SikaForce® 7752).

As juntas que utilizam o Araldite® AV138 também registaram o maior pico de tensão (138,3), que foi maior cerca de 41,1% em comparação com o Araldite® 2015 e maior cerca de 135,5% em comparação com o SikaForce® 7752. Este facto também se deve à diferença de rigidez dos adesivos.

3.2.6.2.4 Raio do T

Na Figura 81, Figura 82 e Figura 83 estão representadas tensões τ_{xy} normalizadas para os diferentes raios do T (r) para cada um dos três adesivos em estudo (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, respetivamente).

Verifica-se que as tensões são máximas no ponto $x/l=0$, em consonância com as diferentes geometrias anteriores. Também é possível verificar que a variação de r não altera as tensões nesse ponto. Como a geometria na zona livre da junta é igual, era esperado que não houvesse alterações nas tensões no ponto $x/l=0$. Observa-se também uma ligeira variação das tensões τ_{xy} na zona do r , devido à variação de rigidez dos componentes nessa zona. No entanto, há um aumento de tensão τ_{xy} na zona de início do raio e que é gerada em pontos x/l diferentes consoante o valor de r . Para um raio maior, a tensão gerada inicia-se numa zona mais à esquerda de x/l , em virtude da maior extensão de zona rígida.

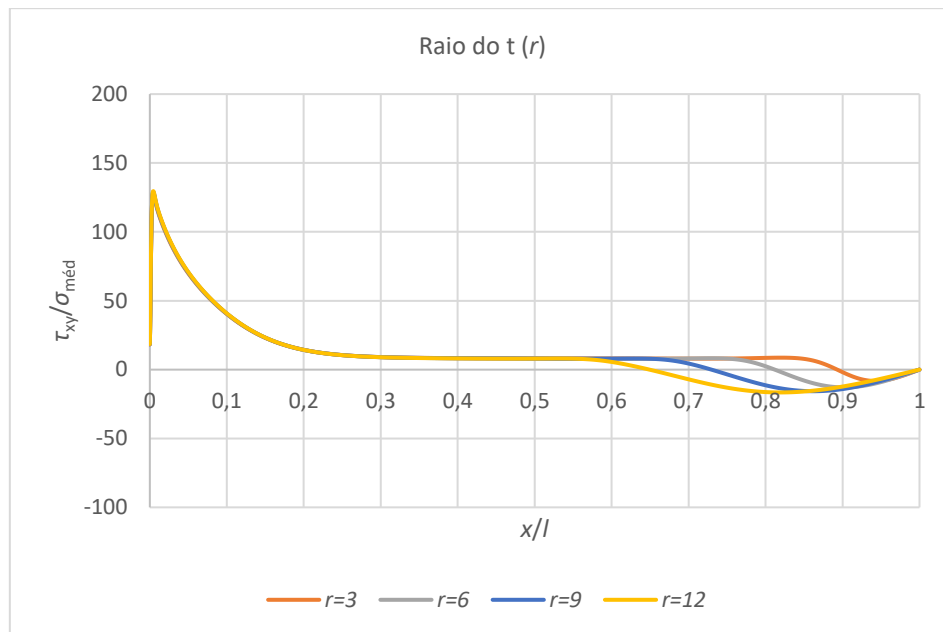


Figura 81 - Tensões $\tau_{xy}/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de r (Araldite® AV138).

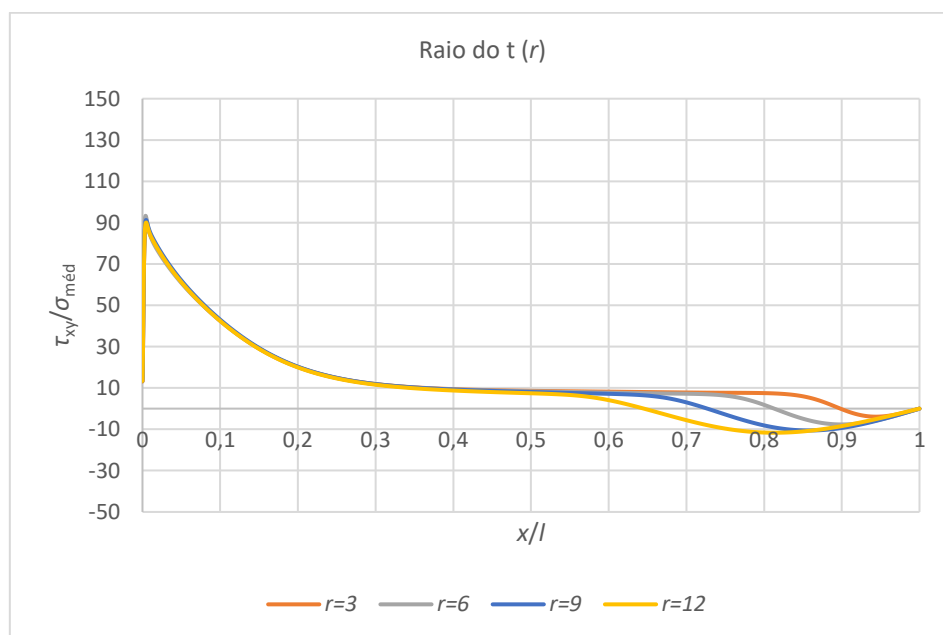


Figura 82 - Tensões $\tau_{xy}/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de r (Araldite® 2015).

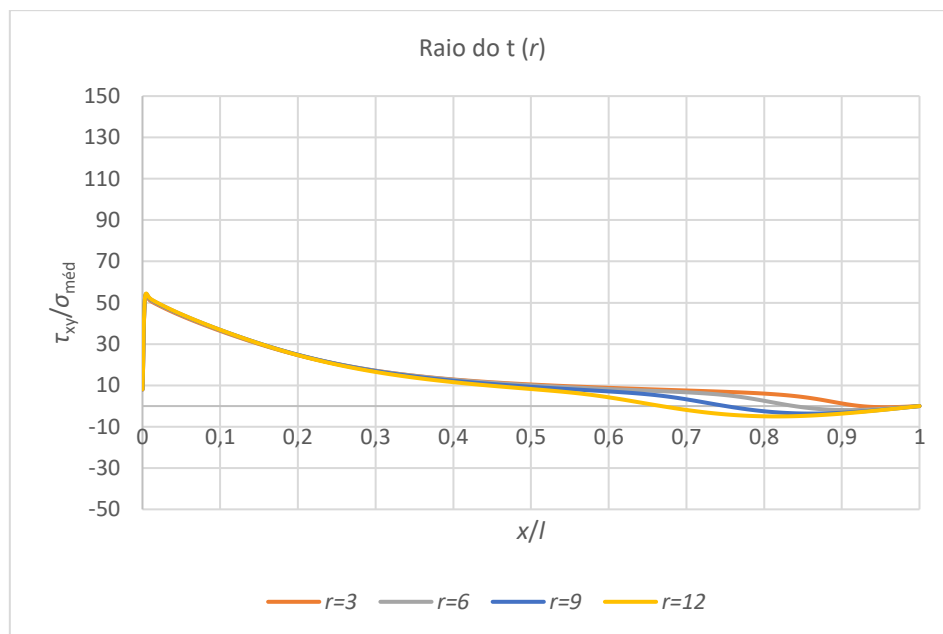


Figura 83 - Tensões $\tau_{xy}/\sigma_{méd}$ para diferentes valores de r (SikaForce® 7752).

As juntas que utilizam o Araldite® AV138 registaram o maior pico de tensão (129,5), que foi maior cerca de 43,8% em comparação com o Araldite® 2015 e maior cerca de 137,8% em comparação com o SikaForce® 7752. A justificação é igual à apresentada para as análises geométricas anteriores.

3.2.7 Estudo da variável de dano

Este estudo tem como objetivo descrever a variável do dano dos elementos coesivos do adesivo (SDEG) no instante de $P_{máx}$, para uma melhor percepção do processo de rotura. Para isso será analisada a extensão do dano ao longo do adesivo sob carregamento. Para um valor SDEG=0, o elemento coesivo ainda não sofreu degradação e para SDEG=1, o elemento coesivo encontra-se na máxima degradação. Serão analisados os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752 para cada uma das quatro variáveis geométricas: a , t , l e r .

3.2.7.1 Espessura da base

A Figura 84 representa a variável de dano SDEG na camada de adesivo Araldite® AV138 no instante em que $P_{máx}$ é atingida para os vários valores de a , em função de x/l . Em relação à percentagem de adesivo com dano total, registou-se uma ligeira diminuição da percentagem com o aumento dos valores de a (1, 2, 3 e 4 mm) de 97,5; 96,8; 95,5 e 94,8%, respetivamente. Observa-se que essa percentagem é bastante grande para todos os valores de a e que está relacionada com a fragilidade deste adesivo.

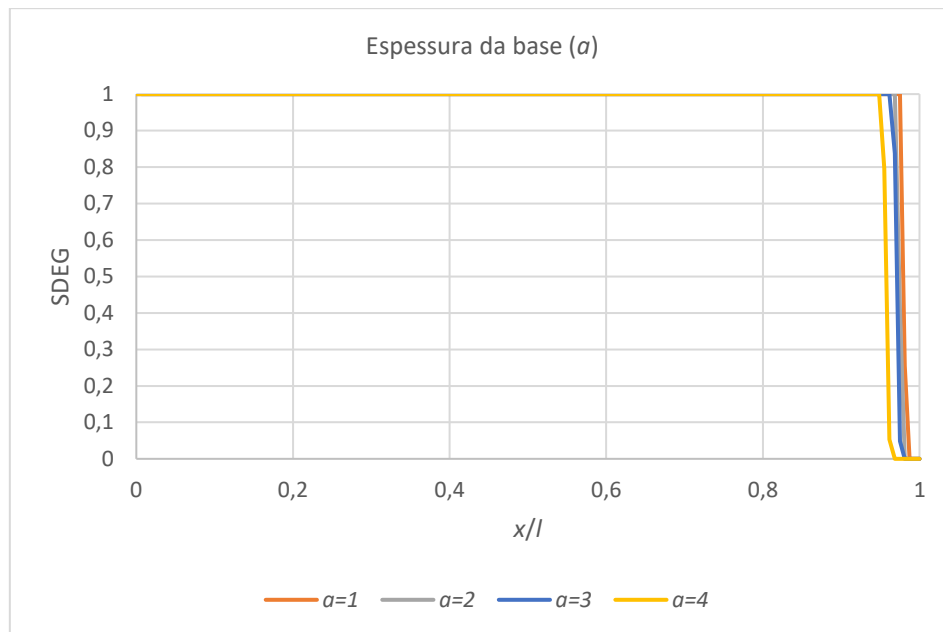


Figura 84 – Variável de dano SDEG para os diferentes valores de a no instante $P_{\text{máx}}$ (Araldite® AV138).

Em relação à quantidade de adesivo em dano quando $P_{\text{máx}}$ é atingida, verifica-se que esta praticamente não se altera com o aumento dos valores de a . De facto, no instante em que se atinge $P_{\text{máx}}$ para todos os valores de a (1, 2, 3 e 4 mm), a percentagem de adesivo danificado é de 1,2; 1,3; 1,3 e 2,0%, respetivamente. A única exceção foi para $a=4$ mm que registou um ligeiro aumento. A baixa percentagem de adesivo em dano deve-se ao facto de o mesmo ser pouco dúctil, ou seja, não absorve os picos de tensão existentes.

A Figura 85 representa a variável de dano SDEG na camada de adesivo Araldite® 2015 no instante em que $P_{\text{máx}}$ é atingida para os vários valores de a , em função de x/l . Em relação à percentagem de dano total no adesivo, registou-se um aumento com o aumento dos valores de a de 13,4; 48,1; 59,5 e 57,5%, respetivamente. Há uma exceção para $a=3$ mm, que registou uma percentagem ligeiramente superior do que $a=4$ mm. Verifica-se que a quantidade de dano no adesivo quando $P_{\text{máx}}$ é atingida aumenta com o aumento dos valores de a . De facto, no instante em que se atinge $P_{\text{máx}}$ para todos os valores de a (1, 2, 3 e 4 mm) a percentagem de adesivo danificado é de 18,7; 27,4; 24,7 e 30,0%, respetivamente. Observa-se que a percentagem de dano em juntas em juntas com Araldite® 2015 é bastante superior em comparação às juntas em Araldite® AV138. Por outro lado, a percentagem de rotura com juntas em Araldite® 2015 é também bastante inferior em comparação com juntas em Araldite® AV138. Este comportamento está relacionado com o aumento significativo de ductilidade do Araldite® 2015 em relação ao Araldite® AV138.

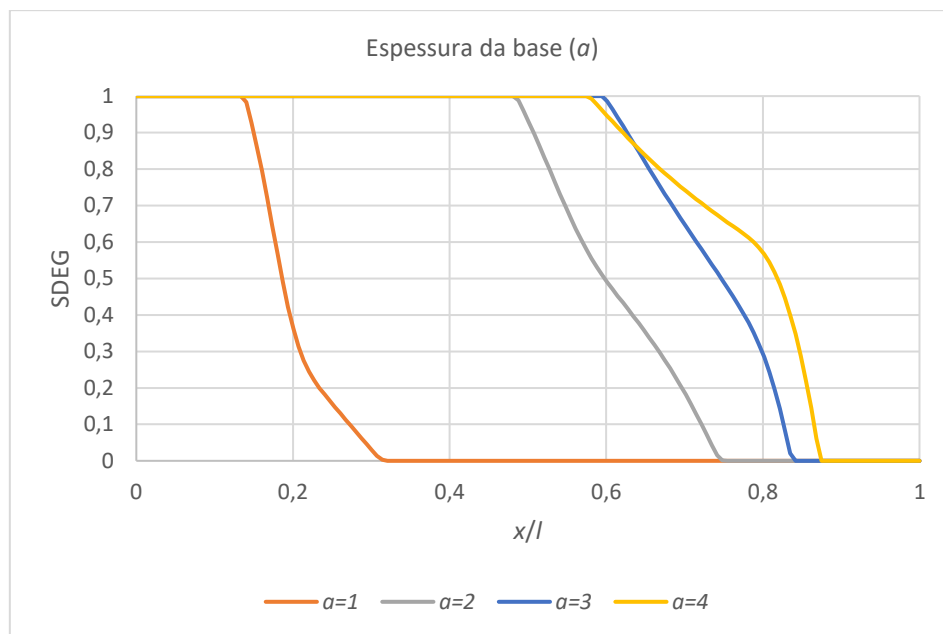


Figura 85 - Variável de dano SDEG para os diferentes valores de a no instante $P_{\text{máx}}$ (Araldite® 2015).

A Figura 86 representa a variável de dano SDEG na camada de adesivo SikaForce® 7752 no instante em que $P_{\text{máx}}$ é atingida para os vários valores de a , em função de x/l . No que diz respeito à percentagem de dano total no adesivo, a mesma não se verificou para nenhum dos valores de a , mas esteve com valores muito próximos até $x/l \approx 0,8$. Depois desse valor, há um decréscimo na percentagem de dano. Verifica-se que a quantidade de dano no adesivo, quando $P_{\text{máx}}$ é atingida, é total para $a=2, 3$ e 4 mm. Há, no entanto, uma exceção para $a=1$ mm, que regista 88,8% de quantidade dano em comparação com os restantes valores (100%).

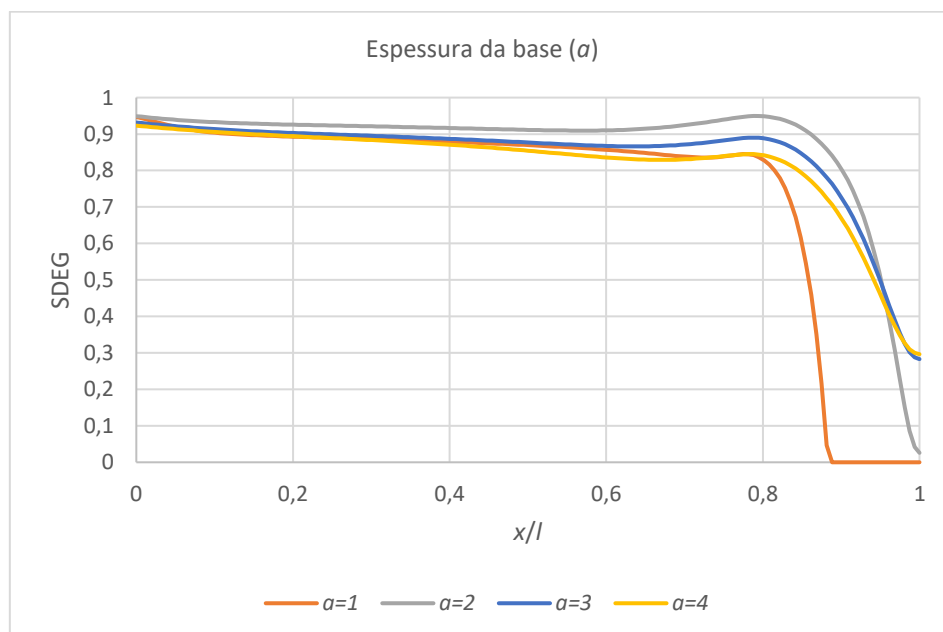


Figura 86 - Variável de dano SDEG para os diferentes valores de a no instante $P_{\text{máx}}$ (SikaForce® 7752).

A percentagem de adesivo em dano em juntas com SikaForce® 7752 é bastante superior em comparação com as juntas com Araldite® 2015, atingindo praticamente a totalidade de x/l . Por outro lado, a percentagem de rotura em juntas com juntas em Araldite® 2015 é bastante superior em comparação com juntas em SikaForce® 7752. É possível verificar o aumento da ductilidade do adesivo SikaForce® 7752 em relação ao Araldite® 2015, capaz de absorver picos de tensão gerados.

3.2.7.2 Espessura do T

A Figura 87 representa a variável de dano SDEG na camada de adesivo Araldite® AV138 no instante em que $P_{\text{máx}}$ é atingida para os vários valores de t , em função de x/l . Em relação à percentagem de dano total no adesivo, registou-se um aumento da percentagem para valores de t (0,5; 1; 1,5; 2 e 2,5 mm) de 20,7; 68,4; 95,5; 96,0 e 95,8%, respetivamente. As percentagens obtidas de adesivo em rotura foram bastante altas, com a exceção para $t=0,5$ mm, que registou um valor bastante inferior.

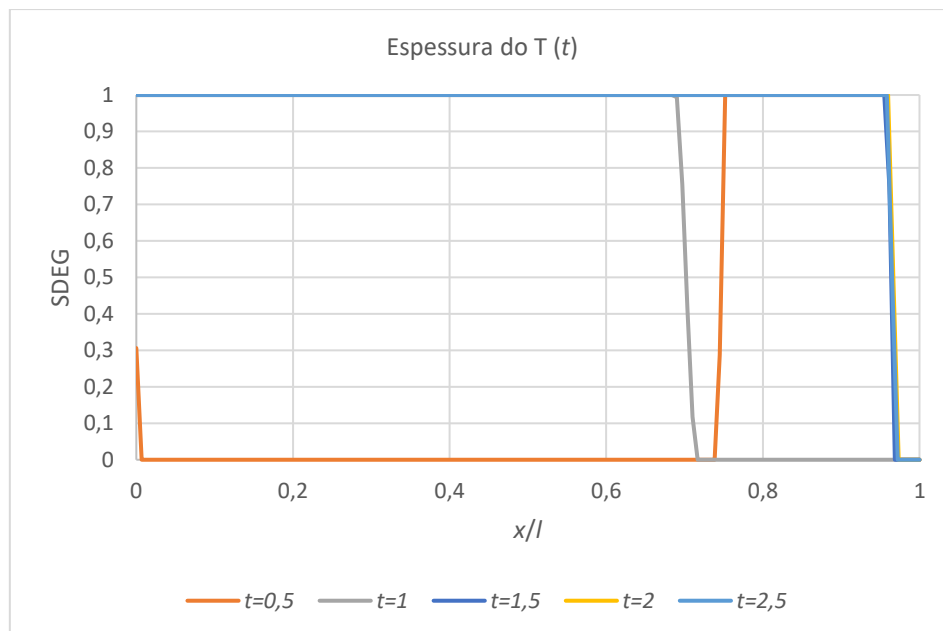


Figura 87 - Variável de dano SDEG para os diferentes valores de t no instante $P_{\text{máx}}$ (Araldite® AV138).

Através da Figura 88, verifica-se que o modo de rotura para $t=0,5$ mm foi bastante diferente das restantes juntas que registaram o início da rotura em $x/l=0$. A rotura para $t=0,5$ mm teve início em valores muito próximos de $x/l=0,8$ e propagou-se para as extremidades da junta. É possível verificar que, quando $P_{\text{máx}}$ é atingida, a maioria do adesivo para $t=0,5$ mm encontra-se em regime elástico. É também possível verificar que a junta é deformada plasticamente na zona de início do raio, devido à geometria mais esbelta do T.

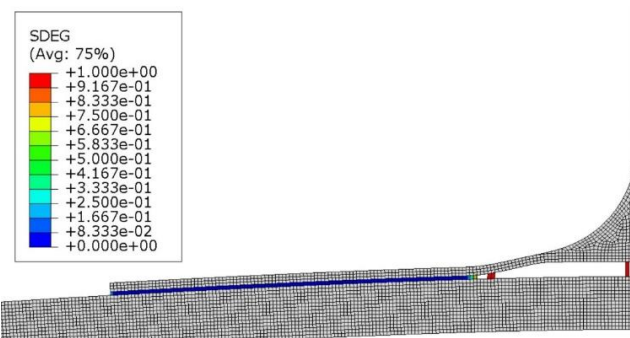


Figura 88 - Variável de dano SDEG para $t=0,5$ mm no instante de $P_{máx}$ (Araldite® AV138).

No que se refere à quantidade de adesivo em dano quando $P_{máx}$ é atingida, verificam-se valores superiores para $t=0,5$ mm e $t=1$ mm. De facto, no instante em que se atinge $P_{máx}$ para todos os valores de t , a percentagem de adesivo danificado é de 2,7; 3,3; 1,3; 1,3 e 1,4%, respetivamente. A baixa percentagem de adesivo em dano deve-se ao facto de o mesmo ser pouco dúctil, ou seja, não absorve os picos de tensão existentes.

A Figura 89 representa a variável de dano SDEG na camada de adesivo Araldite® 2015 no instante em que $P_{máx}$ é atingida para os vários valores de t , em função de x/l .

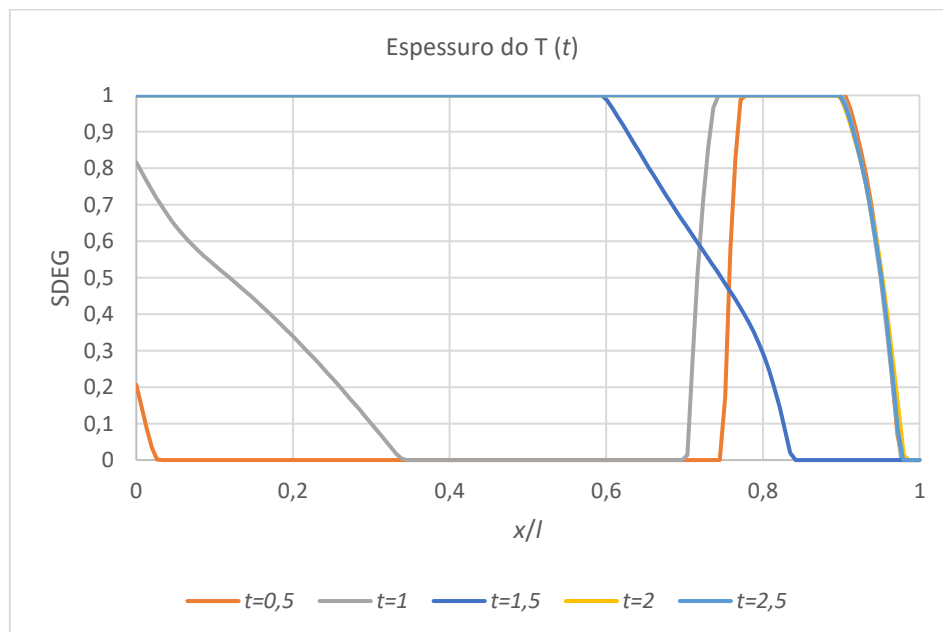


Figura 89 - Variável de dano SDEG para os diferentes valores de t no instante $P_{máx}$ (Araldite® 2015).

No que diz respeito à percentagem de dano total no adesivo, registou-se um aumento da percentagem com o aumento dos valores de t (0,5; 1; 1,5; 2 e 2,5 mm) de 12,7; 15,3; 59,5; 89,3 e 89,8%, respetivamente. Verifica-se um aumento na quantidade de dano no adesivo quando $P_{máx}$ é atingida, em relação ao adesivo Araldite® AV138. De facto, no instante em que se atinge $P_{máx}$ para todos os valores de t , a percentagem de adesivo danificado é de 14,0; 47,2; 24,7; 9,3 e 8,1%, respetivamente.

A rotura para $t=0,5$ mm e $t=1$ mm foi diferente do registado para os restantes valores de t no instante em que $P_{\text{máx}}$ é atingida. Na Figura 90 é possível verificar as diferentes roturas para $t=1$ mm e $t=1,5$ mm.

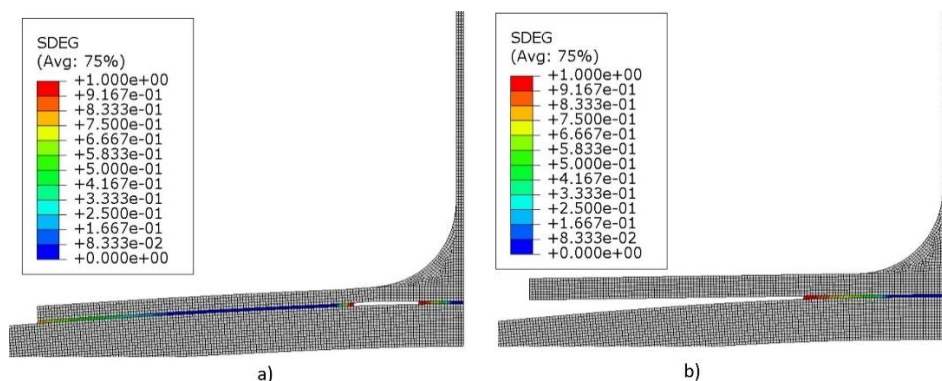


Figura 90 - Variável de dano SDEG no instante $P_{\text{máx}}$ (Araldite® 2015): a) $t=1$ mm e b) $t=1,5$ mm.

A rotura para $t=0,5$ mm e $t=1$ mm teve início em valores muito próximos de $x/l=0,8$ e propagou-se para as extremidades da junta. É possível verificar que a junta é deformada plasticamente na zona de início do raio, devido à geometria mais esbelta do T. Por outro lado, valores de t mais elevados promovem a rigidez do T, o que propicia o início de dano em $x/l=0$. Observa-se que a percentagem de dano em juntas em juntas com Araldite® 2015 é bastante superior em comparação com juntas em Araldite® AV138. Por outro lado, a percentagem de rotura com juntas em Araldite® 2015 é inferior em comparação com juntas em Araldite® AV138. Posto isto, verifica-se um aumento significativo de ductilidade do Araldite® 2015 em relação ao Araldite® AV138.

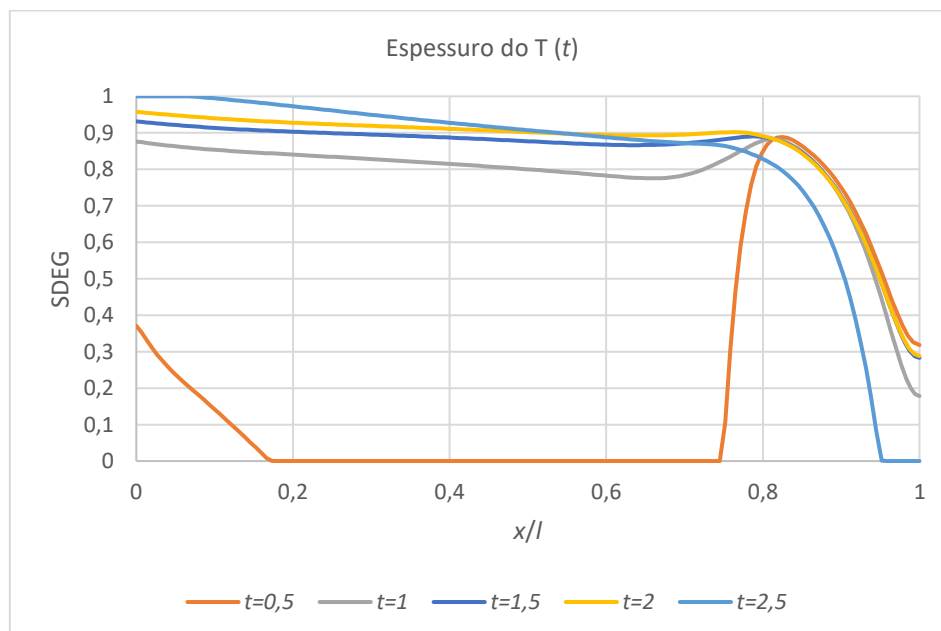


Figura 91 - Variável de dano SDEG para os diferentes valores de t no instante $P_{\text{máx}}$ (SikaForce® 7752).

A Figura 91 representa a variável de dano SDEG na camada de adesivo SikaForce® 7752 no instante em que $P_{\text{máx}}$ é atingida para os vários valores de t , em função de x/l . Apenas se verificou rotura total no adesivo para $t=2,5$ mm. A percentagem de rotura para esta geometria de junta foi de 6,7%. Para os restantes valores de t , e como se pode verificar na Figura 91, não ocorreu rotura, apesar de o dano chegar a valores muito próximos de $\text{SDEG}=1$ entre $x/l=0$ e $x/l \simeq 0,8$. Depois disso, há um decréscimo na percentagem de dano. Verifica-se que a quantidade de dano no adesivo quando $P_{\text{máx}}$ é atingida, é total para todos os valores de $t=1$ mm, $t=1,5$ mm e $t=2$ mm. O adesivo é então deformado plasticamente, mas não ocorre rotura.

Através da análise da Figura 92 verifica-se uma diferença na variável SDEG quando $P_{\text{máx}}$ é atingida para $t=0,5$ mm e $t=2,5$ mm. Conforme se pode verificar, para a geometria esbelta com $t=0,5$ mm não se verificou rotura mas, por outro lado, registam-se valores de SDEG bastante elevados no início do raio. Por outro lado, para $t=2,5$ mm, devido à rigidez do T, ocorre rotura no adesivo na extremidade $x/l=0$.

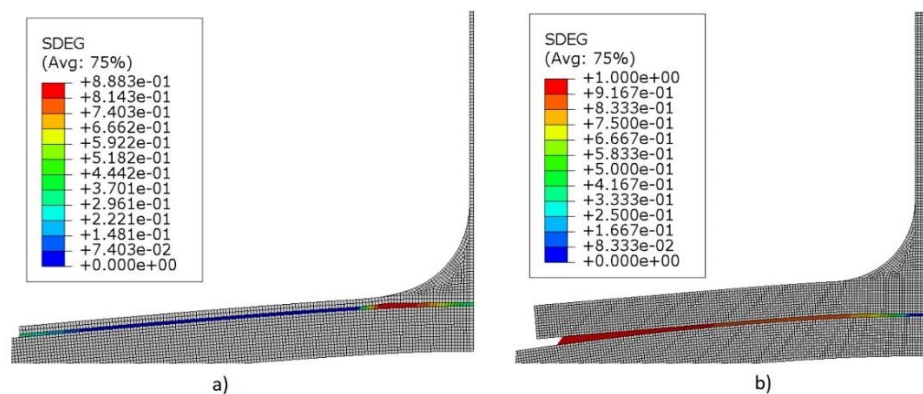


Figura 92 - Variável de dano SDEG no instante $P_{\text{máx}}$ (SikaForce® 7752): a) $t=0,5$ mm e b) $t=2,5$ mm.

A percentagem de adesivo em dano em juntas em juntas com SikaForce® 7752 é bastante superior em comparação com juntas em Araldite® 2015, atingindo praticamente a totalidade de x/l . Por outro lado, a percentagem de rotura em juntas com juntas em Araldite® 2015 é bastante superior em comparação com juntas em SikaForce® 7752. É possível verificar o aumento da ductilidade do adesivo SikaForce® 7752 em relação ao Araldite® 2015, capaz de absorver picos de tensão gerados.

3.2.7.3 Comprimento de sobreposição

A Figura 93 representa a variável de dano SDEG na camada de adesivo Araldite® AV138 no instante em que $P_{\text{máx}}$ é atingida para os vários valores de t , em função de x/l . Em relação à percentagem de dano total no adesivo, registou-se um ligeiro aumento da percentagem com o aumento dos valores de l (10, 20, 30 e 40 mm) de 86,5; 94,2; 95,5 e 97,0%, respetivamente. Observa-se que a percentagem de rotura para todos os valores de l é bastante grande e que está relacionada com a fragilidade deste adesivo.

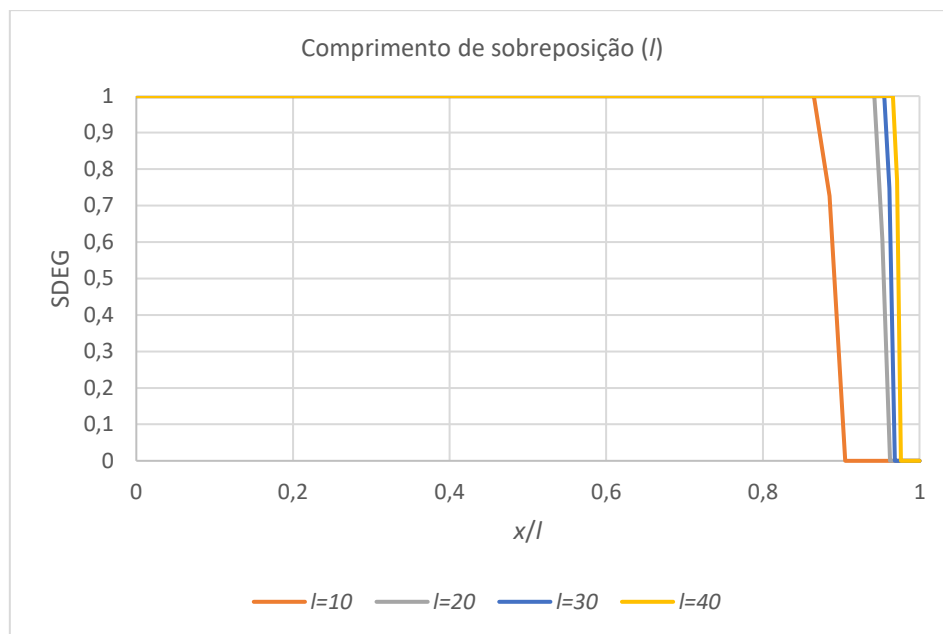


Figura 93 - Variável de dano SDEG para os diferentes valores de l no instante $P_{m\acute{a}x}$ (Araldite® AV138).

Em relação à quantidade de adesivo em dano quando $P_{m\acute{a}x}$ é atingida, verifica-se que é bastante baixa para todos os valores de l . De facto, no instante em que se atinge $P_{m\acute{a}x}$, para todos os valores de l , a percentagem de adesivo danificado é de 4,0; 2,0; 1,3 e 1,0%, respetivamente. No entanto, observa-se uma tendência de aumento de adesivo em dano com a diminuição de l , o que está relacionado com a diminuição dos picos de tensão (Figura 68). A baixa percentagem de adesivo em dano deve-se ao facto de o mesmo ser pouco dúctil, ou seja, não absorve os picos de tensão existentes.

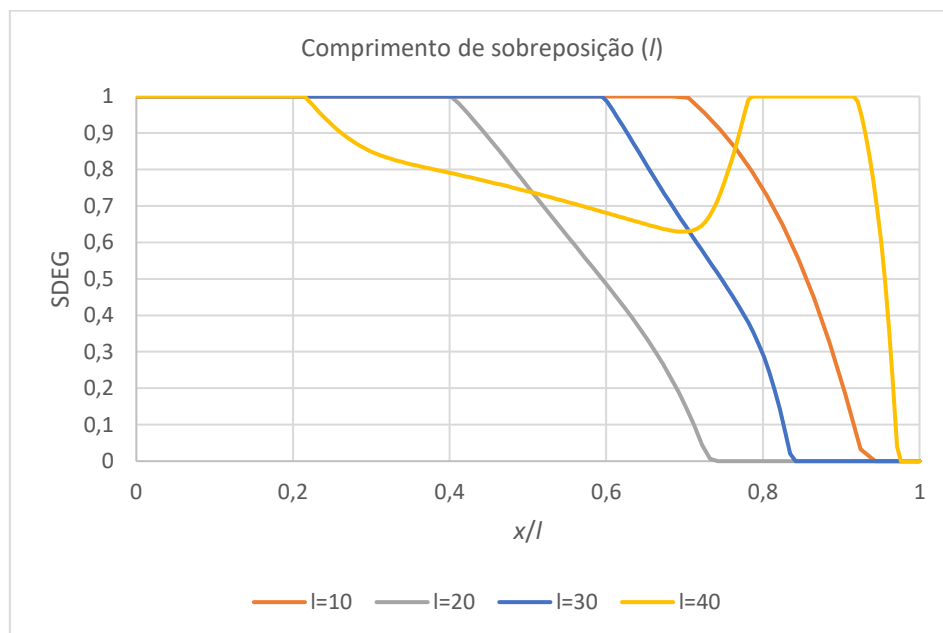


Figura 94 - Variável de dano SDEG para os diferentes valores de l no instante $P_{m\acute{a}x}$ (Araldite® 2015).

A Figura 94 representa a variável de dano SDEG na camada de adesivo Araldite® 2015 no instante em que $P_{\text{máx}}$ é atingida para os vários valores de l , em função de x/l . Em relação à percentagem de adesivo em rotura, não é possível obter uma relação entre o comprimento l e a percentagem de rotura. Na verdade, os valores obtidos para l (10, 20, 30 e 40 mm) foram 68,5; 40,2; 59,5 e 34,0%, respetivamente. Também não é possível obter uma proporcionalidade na quantidade de dano no adesivo quando $P_{\text{máx}}$ é atingida. Os valores obtidos para l foram 25,9; 34,1; 24,7 e 63,6% respetivamente.

Para $l=40$ mm a percentagem de adesivo em dano e a percentagem de rotura foram de certa forma diferentes das restantes juntas. Através da Figura 95 verifica-se que, no instante em que $P_{\text{máx}}$ é atingida, o adesivo estava em rotura em duas zonas distintas. Este facto explica a percentagem elevada de adesivo em dano.

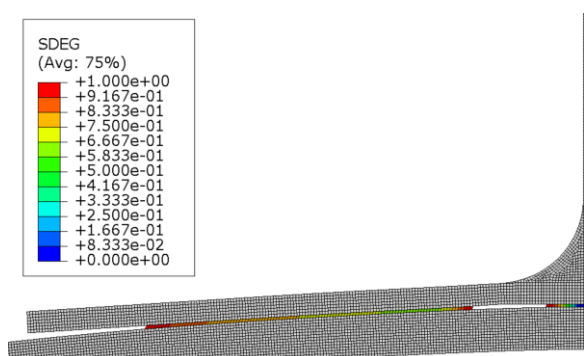


Figura 95 - Variável de dano SDEG para $l=40$ mm no instante $P_{\text{máx}}$ (Araldite® 2015).

Observa-se também que a percentagem de dano em juntas em juntas com Araldite® 2015 é bastante superior em comparação com juntas em Araldite® AV138. Por outro lado, a percentagem de rotura com juntas em Araldite® 2015 é também bastante inferior em comparação com juntas em Araldite® AV138. Esta diferença encontra-se relacionada com o aumento significativo de ductilidade do Araldite® 2015 em relação ao Araldite® AV138.

A Figura 96 representa a variável de dano SDEG na camada de adesivo SikaForce® 7752 no instante em que $P_{\text{máx}}$ é atingida para os vários valores de l , em função de x/l . Não se observou adesivo em rotura para nenhum dos valores de l , apesar de existir uma elevada percentagem de dano até valores muito próximos até $x/l \approx 0,8$. Depois desse valor, há um decréscimo na percentagem de dano, com a exceção de $l=10$ mm, que regista valores de SDEG nulos depois dessa região. Verifica-se a totalidade de adesivo em danos quando $P_{\text{máx}}$ é atingida para todos os valores de l . Há, no entanto, uma exceção para $l=10$ mm, que regista 92,5% de quantidade dano em comparação com os restantes valores (100%). A percentagem de adesivo em dano em juntas em juntas com SikaForce® 7752 é bastante superior em comparação com juntas em Araldite® 2015, atingindo praticamente a totalidade de x/l . Por outro lado, a percentagem de rotura em juntas com juntas em Araldite® 2015 é bastante superior em comparação com juntas

em SikaForce® 7752. É possível verificar o aumento da ductilidade do adesivo SikaForce® 7752 em relação ao Araldite® 2015, capaz de absorver picos de tensão gerados.

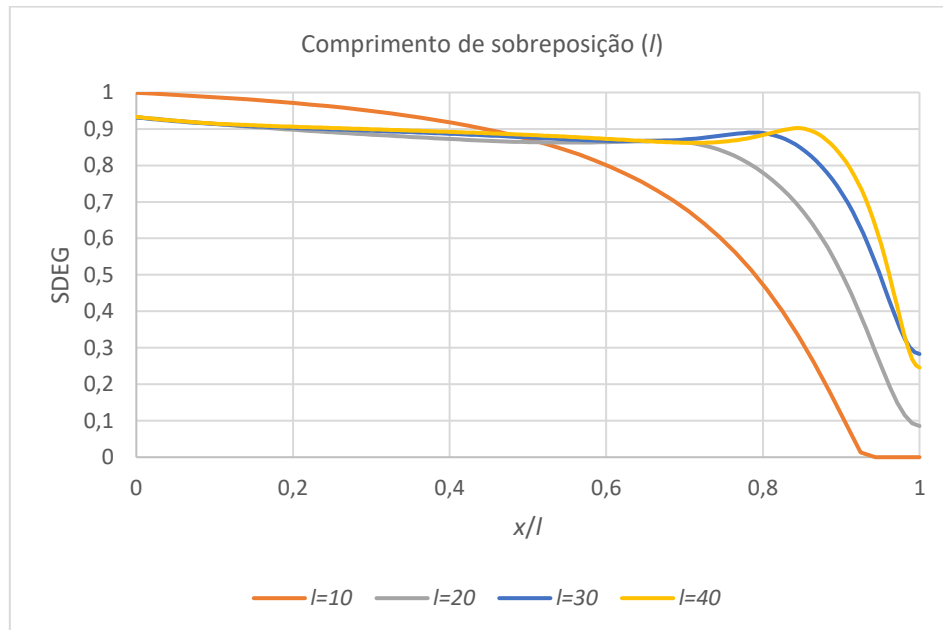


Figura 96 - Variável de dano SDEG para os diferentes valores de l no instante $P_{\text{máx}}$ (SikaForce® 7752).

3.2.7.4 Raio do T

A Figura 97 representa a variável de dano SDEG na camada de adesivo Araldite® AV138 no instante em que $P_{\text{máx}}$ é atingida para os vários valores de r , em função de x/l .

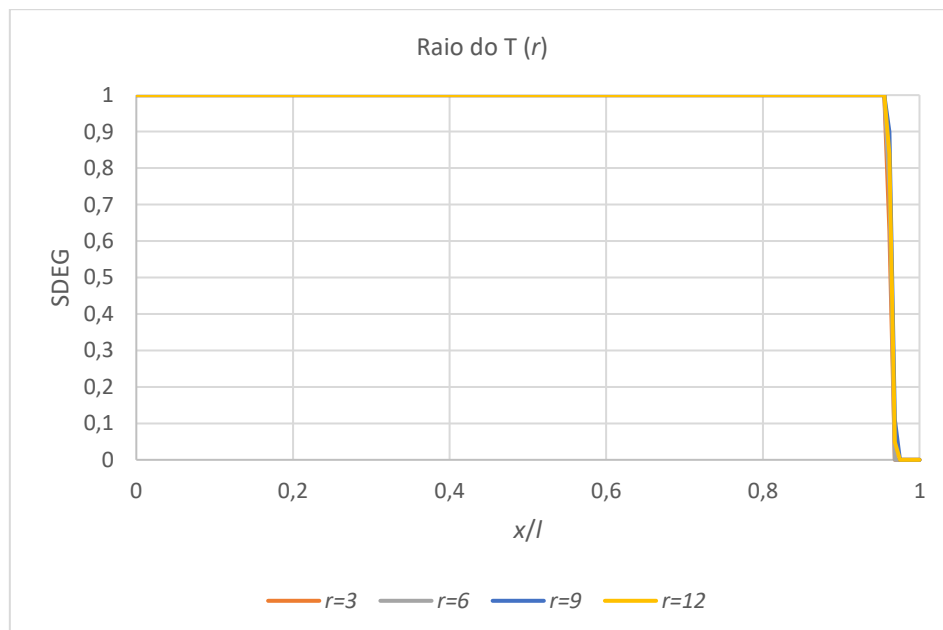


Figura 97 - Variável de dano SDEG para os diferentes valores de r no instante $P_{\text{máx}}$ (Araldite® AV138).

Relativamente à percentagem de adesivo com dano total, registou-se a mesma percentagem para todos os valores de r (3, 6, 9 e 12 mm), de 95,5%. Observa-se que a

percentagem de rotura para todos os valores de r é bastante elevada, o que está relacionado com a fragilidade deste adesivo. Em relação à quantidade de adesivo em dano quando $P_{\text{máx}}$ é atingida, verifica-se que esta praticamente não se altera com o aumento dos valores de r . De facto, no instante em que se atinge $P_{\text{máx}}$ para todos os valores de a (3, 6, 9 e 12 mm) a percentagem de adesivo danificado é de 1,3; 1,3; 2,0 e 2,0%, respetivamente. A baixa percentagem de adesivo em dano deve-se ao facto de o mesmo ser pouco dúctil, ou seja, não absorve os picos de tensão existentes e não permite uma zona de processo de dano.

A Figura 98 representa a variável de dano SDEG na camada de adesivo Araldite® 2015 no instante em que $P_{\text{máx}}$ é atingida para os vários valores de r , em função de x/l .

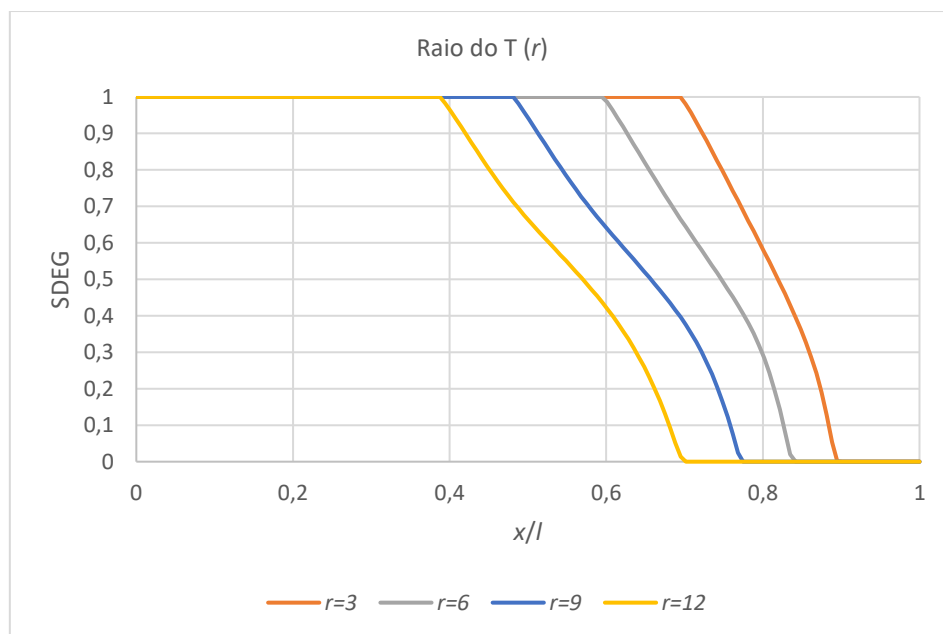


Figura 98 - Variável de dano SDEG para os diferentes valores de r no instante $P_{\text{máx}}$ (Araldite® 2015).

Contrariamente ao adesivo Araldite® AV138, para este adesivo observa-se uma diferença significativa de comportamento em função de r . De facto, registou-se uma diminuição da percentagem de adesivo em rotura com o aumento dos valores de r (3, 6, 9 e 12 mm) de 69,5; 59,5; 48,1 e 38,8%, respetivamente. Por outro lado, também se verifica que a quantidade de dano no adesivo quando $P_{\text{máx}}$ é atingida aumenta com o aumento dos valores de r . De facto, no instante em que se atinge $P_{\text{máx}}$ para todos os valores de r , a percentagem de adesivo danificado é de 9,8; 24,7; 29,4 e 31,4%, respetivamente. Observa-se que a percentagem de dano em juntas em juntas com Araldite® 2015 é bastante superior em comparação com juntas em Araldite® AV138. Por outro lado, a percentagem de rotura com juntas em Araldite® 2015 é também bastante inferior em comparação com juntas em Araldite® AV138. Esta alteração de comportamento de dano está relacionada com um aumento significativo de ductilidade do Araldite® 2015 em relação ao Araldite® AV138.

A Figura 99 representa a variável de dano SDEG na camada de adesivo SikaForce® 7752 no instante em que $P_{\text{máx}}$ é atingida para os vários valores de r , em função de x/l .

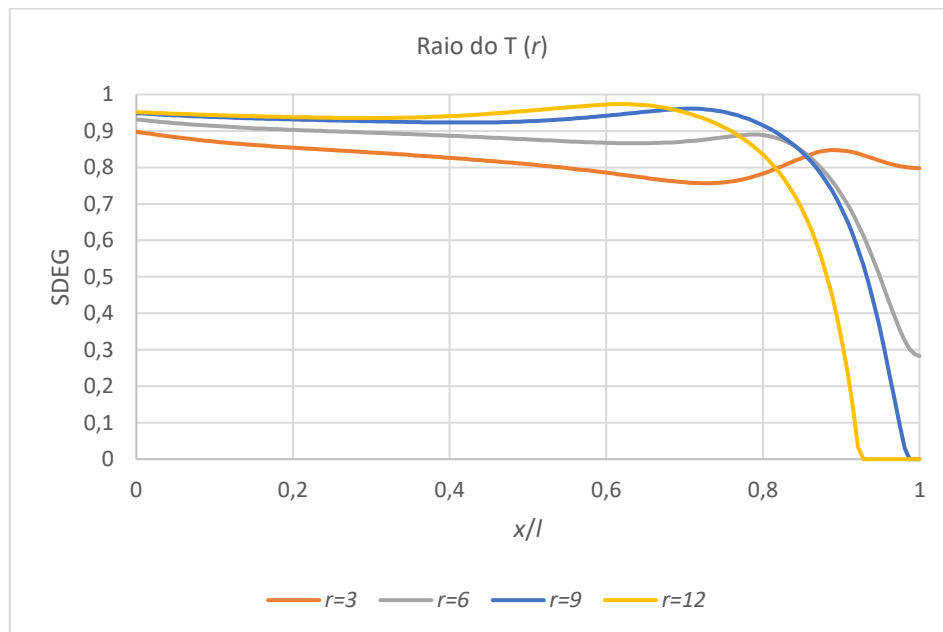


Figura 99 - Variável de dano SDEG para os diferentes valores de r no instante $P_{\text{máx}}$ (SikaForce® 7752).

Em relação à percentagem de adesivo com dano total, a mesma não se verificou para nenhum dos valores de r , mas esteve com valores muito próximos até $x/l \approx 0,8$. Depois desse valor, há um decréscimo significativo na percentagem de dano, exceto para $r=3$ mm. Verifica-se que a quantidade de dano no adesivo quando $P_{\text{máx}}$ é atingida é total para $r=3$ e 6 mm. Para $r=9$ mm e $r=12$ mm, as percentagens de dano são 98,8 e 92,8%, respetivamente. A percentagem de adesivo em dano em juntas com SikaForce® 7752 é bastante superior em comparação com juntas em Araldite® 2015, atingindo praticamente a totalidade de x/l . Por outro lado, a percentagem de rotura em juntas com juntas em Araldite® 2015 é bastante superior em comparação com juntas em SikaForce® 7752. É possível verificar o aumento da ductilidade do adesivo SikaForce® 7752 em relação ao Araldite® 2015, capaz de absorver picos de tensão gerados.

3.2.8 Previsão da resistência

Este subcapítulo tem como objetivo avaliar a resistência das juntas adesivas estudadas nesta dissertação, bem como explicar de forma detalhada os resultados obtidos para os diversos tipos de junta. São apresentadas as curvas $P-\delta$ obtidas numericamente e uma comparação da carga máxima $P_{\text{máx}}$ obtida para cada adesivo e para cada uma das quatro variáveis geométricas: a , t , l e r .

3.2.8.1 Espessura da base

Na Figura 100 estão representadas as curvas P - δ para todos os valores de a (1, 2, 3 e 4 mm) para o adesivo Araldite® AV138.

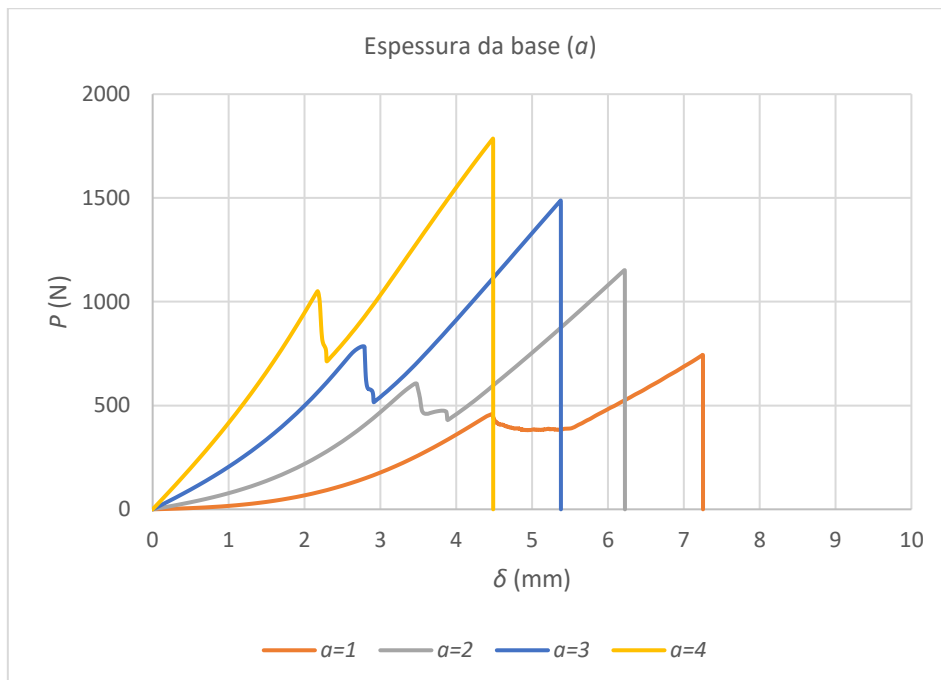


Figura 100 - Curva P - δ para os diferentes valores de a (Araldite® AV138).

Como se pode verificar, o aumento do valor de a faz aumentar o valor da força máxima atingida, devido ao aumento de rigidez da base. Este aumento de rigidez traduz-se num aumento da força máxima devido à diminuição dos picos de tensões σ_y e τ_{xy} que se concentram num comprimento tipicamente muito reduzido de camada de adesivo em $x/l=0$ (Figura 60 e Figura 72). A análise de dano realizada a este adesivo (Figura 84) também mostrou um comportamento frágil, com zona de dano muito reduzida, o que explica a queda abrupta de P após $P_{máx}$. Por outro lado, o aumento do valor de a faz diminuir o valor do deslocamento. Este facto deve-se à diminuição da deformação do substrato da base. Este adesivo é bastante sensível à propagação da fenda até à rotura, o que se reflete num menor deslocamento. De um modo geral, o deslocamento atingido é relativamente baixo e deve-se à fraca ductilidade do adesivo.

Na Figura 101 estão representadas as curvas P - δ para todos os valores de a (1, 2, 3 e 4 mm) para o adesivo Araldite® 2015. Como se pode observar, o aumento do valor de a faz aumentar o valor da $P_{máx}$, que é também devido ao aumento de rigidez da base. Também para este adesivo se observa uma diminuição dos picos de tensões σ_y e τ_{xy} com o aumento de a , o que promove um aumento de $P_{máx}$ (Figura 61 e Figura 73). Por outro lado, o aumento dos valores de a fazem diminuir o valor do deslocamento de rotura. Este adesivo é menos sensível à propagação da fenda até à rotura, consegue absorver picos de tensão existentes o que se traduz num aumento das forças máximas atingidas

em relação ao adesivo Araldite® AV138. Este comportamento pode ser observado na Figura 85, onde observa claramente uma porção de adesivo danificado no instante de $P_{\text{máx}}$, o que traduz uma maior zona de adesivo em carga. Este efeito também tende a aumentar com a . De um modo geral, o deslocamento atingido é maior relativamente adesivo Araldite® AV138, o que se deve ao aumento da ductilidade do adesivo.

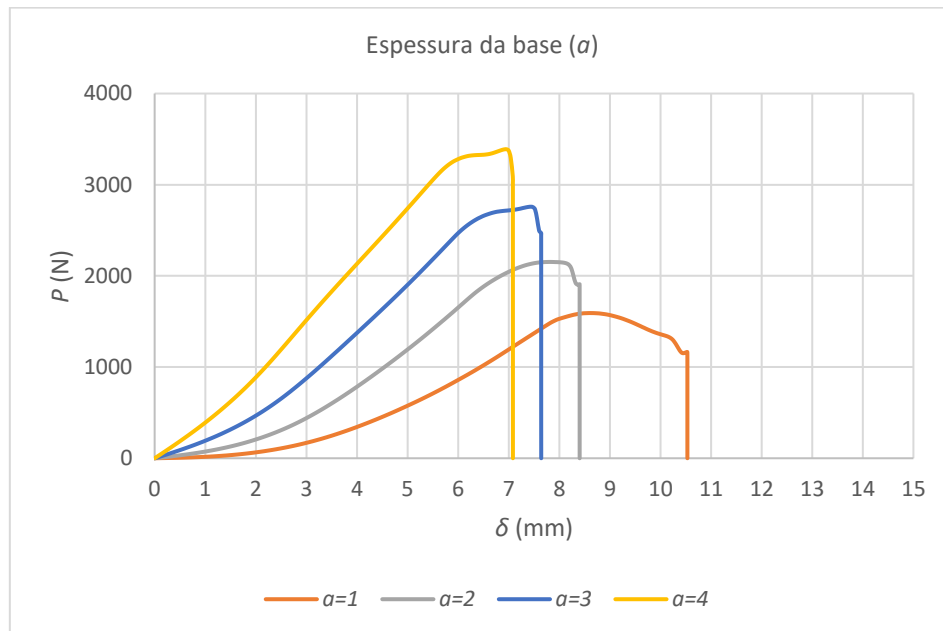


Figura 101 - Curva P - δ para os diferentes valores de a (Araldite® 2015).

Na Figura 102 estão representadas as curvas P - δ para todos os valores de a (1, 2, 3 e 4 mm) para o adesivo SikaForce® 7752.

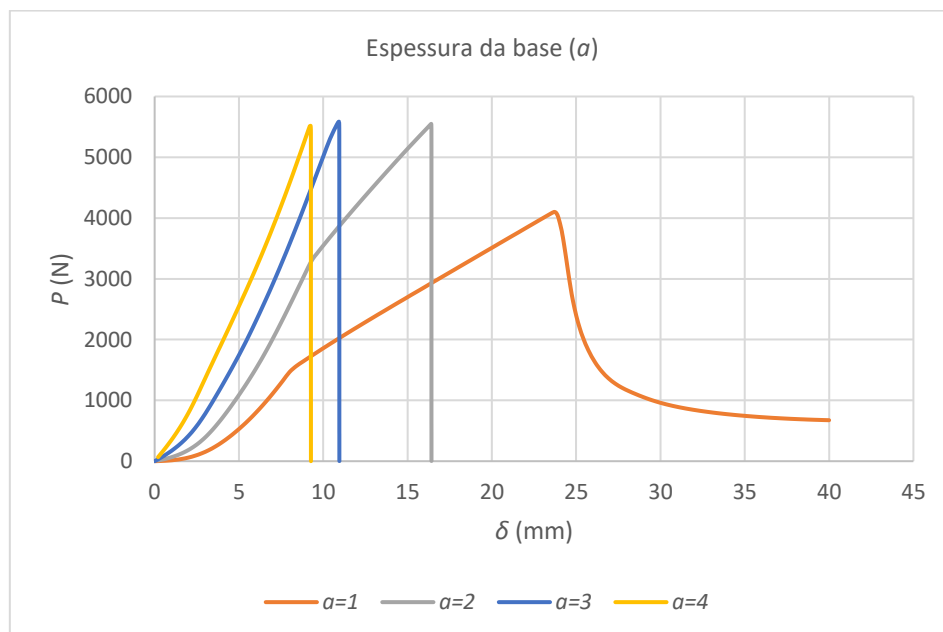


Figura 102 - Curva P - δ para os diferentes valores de a (SikaForce® 7752).

Como se pode observar, o aumento do valor de a não se traduziu num aumento de $P_{m\acute{a}x}$ entre 2 e 4 mm. O valor inferior de $P_{m\acute{a}x}$ para $a=1$ mm deveu-se ao facto de o substrato da base se ter deformado plasticamente e ter entrado em rotura total. É possível verificar a capacidade elevada de plastificação deste adesivo em comparação com os anteriores e que se traduz num aumento de $P_{m\acute{a}x}$. O estudo de tensões σ_y e τ_{xy} mostra um comportamento mais suave na zona crítica ($x/l=0$), comparativamente aos outros adesivos, e também uma redução dos valores de pico com o aumento de a . A ausência de variação de $P_{m\acute{a}x}$ para $2 \leq a \leq 4$ mm está relacionado com o dano quase total no adesivo que se observa nestas juntas, conforme apresentado na Figura 86 e Figura 91. Por outro lado, a diferença acentuada de deslocamento deve-se também a esse facto. De um modo geral, o aumento do valor de a faz diminuir o valor do deslocamento de rotura. Este adesivo é bastante dúctil e não é muito sensível à propagação da fenda até à rotura. Neste caso em específico não se verificou rotura do adesivo e o mesmo só se danificou plasticamente. De um modo geral, o deslocamento atingido é maior relativamente aos adesivos referidos anteriormente e deve-se ao aumento significativo da ductilidade do adesivo.

Na Figura 103 estão representados os valores de $P_{m\acute{a}x}$ para todos os valores de a (1, 2, 3 e 4 mm) para os três adesivos estudados (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752).

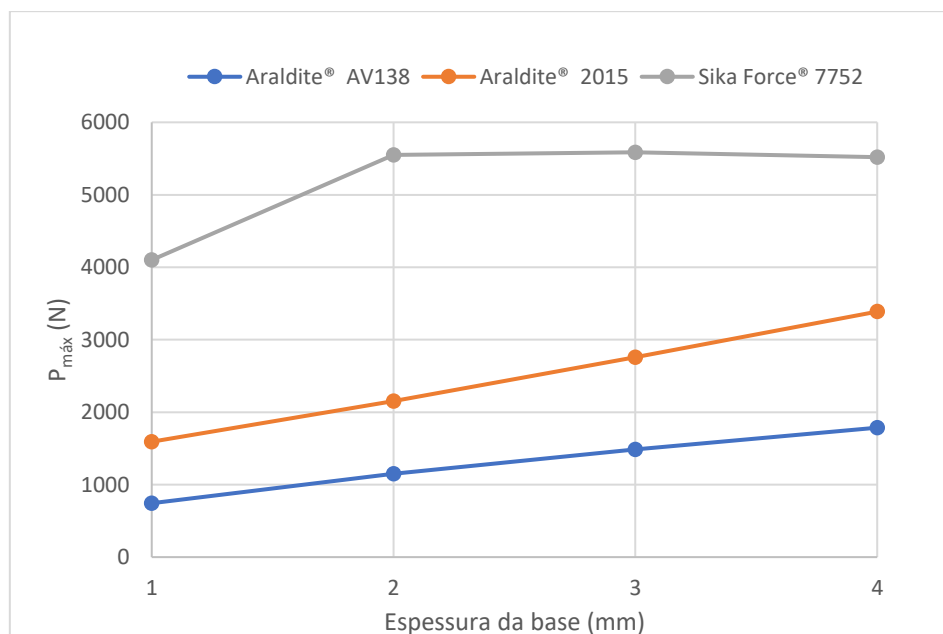


Figura 103 – Valores de $P_{m\acute{a}x}$ para os diferentes valores de a .

Como se pode verificar, as forças $P_{m\acute{a}x}$ com maior grandeza registam-se em adesivos com maior ductilidade, sendo o adesivo SikaForce® 7752 o mais dúctil. Essa elevada ductilidade traduz-se num aumento da plasticidade do adesivo, que origina forças mais elevadas. De outro modo verifica-se que, para os dois adesivos menos dúcteis (Araldite® AV138 e Araldite® 2015), o aumento do valor de a traduz-se num aumento significativo

dos valores de $P_{\text{máx}}$ atingidos. No caso do adesivo mais dúctil, este valor praticamente não se altera. A única exceção ocorre para $a=1$ mm, e justifica-se com a rotura do substrato de base.

3.2.8.2 Espessura do T

Na Figura 104 estão representadas as curvas $P-\delta$ para todos os valores de t (0,5; 1; 1,5; 2 e 2,5 mm) para o adesivo Araldite® AV138.

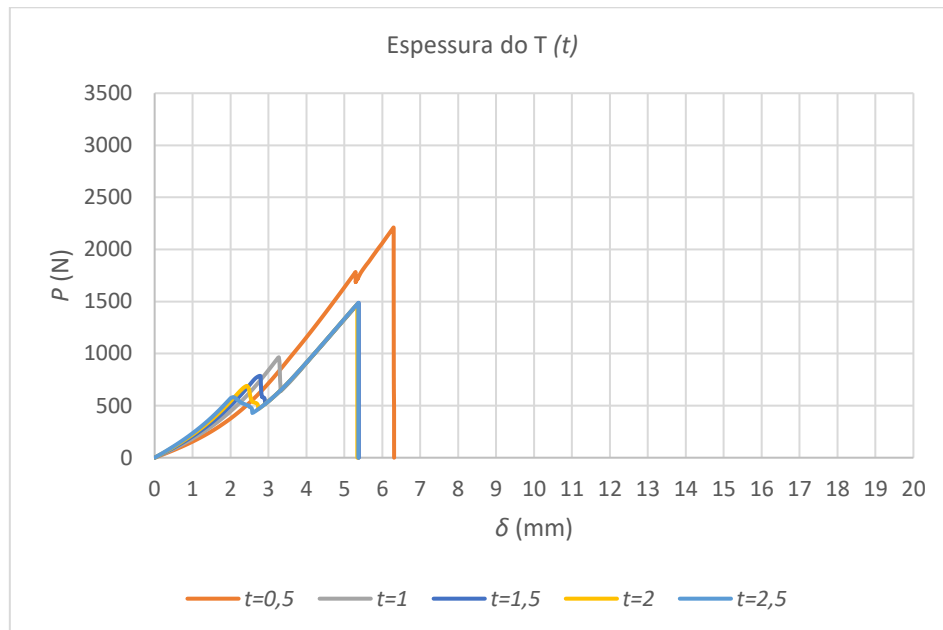


Figura 104 - Curva $P-\delta$ para os diferentes valores de t (Araldite® AV138).

Como se pode observar, para $t=0,5$ mm, o valor de $P_{\text{máx}}$ foi superior em comparação aos restantes valores de t , que se mantiveram iguais. De facto, como se comprova na Figura 63 e Figura 75, o aumento de t promove um aumento de tensões σ_y e τ_{xy} em $x/l=0$ e uma diminuição em $x/l \approx 0,8$. Esta modificação induz a mudança do modo de rotura, que ocorre em $x/l \approx 0,8$ para $t=0,5$ mm, e em $x/l=0$ para os restantes t . Esta modificação do modo de rotura leva a uma resistência superior para $t=0,5$ mm. Através da análise de dano (Figura 87) verificou-se uma diferença no modo como a rotura ocorreu para $t=0,5$ mm. Este facto aumentou bastante a força máxima registada. Em relação ao deslocamento de rotura, de um modo geral, foi bastante baixo. Para $t=0,5$ mm registou-se um maior deslocamento devido à forma esbelta do T, que originou uma maior deformação do perfil T.

Na Figura 105 estão representadas as curvas $P-\delta$ para todos os valores de t (0,5; 1; 1,5; 2 e 2,5 mm) para o adesivo Araldite® 2015.

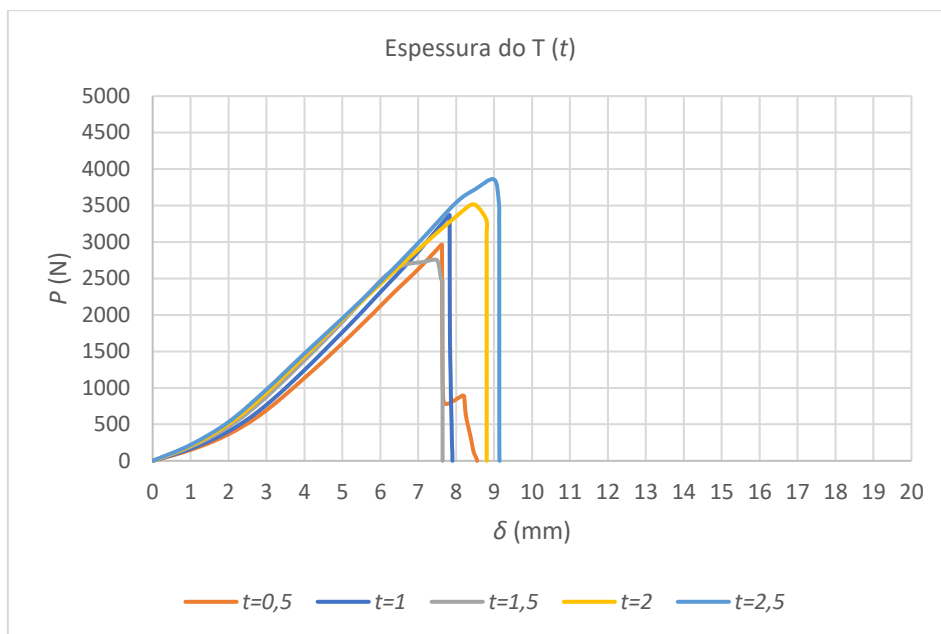


Figura 105 - Curva P - δ para os diferentes valores de t (Araldite® 2015).

Como se pode verificar, com o aumento do valor de t , o valor de $P_{\text{máx}}$ também aumenta. Registou-se, no entanto, uma exceção para $t=1,5$ mm, que registou um valor inferior. Ao observar a Figura 64 e Figura 76, o aumento de t também promove um aumento de tensões σ_y e τ_{xy} em $x/l=0$ e uma diminuição em $x/l \approx 0,8$. Através da análise de dano (Figura 89), verificou-se uma diferença no modo de rotura para $t=0,5$ e $t=1$ mm em comparação com $t=1,5$, 2 e 2,5 mm, de forma que no primeiro caso a rotura ocorreu na zona de $x/l \approx 0,8$, e no segundo caso em $x/l=0$. Observou-se assim quebra de $P_{\text{máx}}$ entre $t=1$ e 1,5 mm devido à mudança do modo de rotura. Para $t>1,5$ mm, registou-se um aumento de resistência até $t=2,5$ mm. Em relação ao deslocamento de rotura, registaram-se valores superiores em comparação com o Araldite® AV138, que se justifica com o aumento da ductilidade do adesivo.

Na Figura 106 estão representadas as curvas P - δ para todos os valores de t (0,5; 1; 1,5; 2 e 2,5 mm) para o adesivo SikaForce® 7752. Como se pode verificar, o valor de $P_{\text{máx}}$ aumenta com o aumento do valor de t . Devido à elevada ductilidade deste adesivo, era esperado que, com o aumento da rigidez do T, os valores de $P_{\text{máx}}$ também aumentassem. Analisando a Figura 65 e Figura 77, as tensões σ_y e τ_{xy} são máximas em função do aumento do t na zona $x/l=0$, mas por outro lado, são máximas em $x/l \approx 0,8$ em função da diminuição do t . Estas tensões são menores comparadas com as tensões dos adesivos anteriores. Este facto deve-se à flexibilidade do adesivo. Através da Figura 91 pode-se também verificar que não há alteração significativa do modo de rotura com a variação de t , exceto no caso de $t=0,5$ mm, onde se observa rotura tanto em $x/l=0$ como em $x/l \approx 0,8$, pelo que há uma tendência estável de aumento de $P_{\text{máx}}$ com t . Verifica-se também um aumento do deslocamento de rotura em função do aumento do t , com a exceção para $t=0,5$ mm, devido à deformação plástica do substrato.

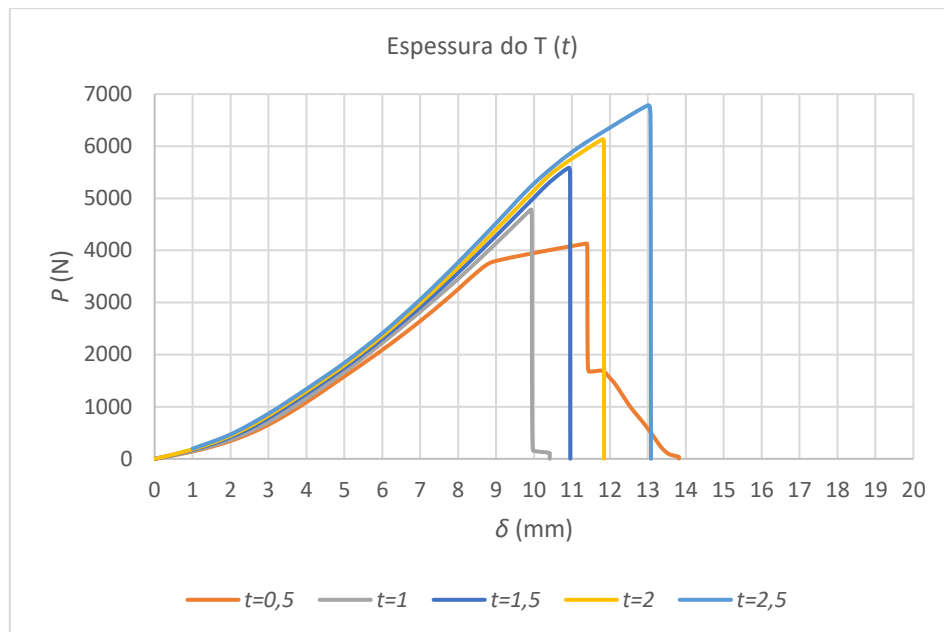


Figura 106 - Curva P - δ para os diferentes valores de t (SikaForce® 7752).

Na Figura 107 estão representados os valores de $P_{\text{máx}}$ para todos os valores de t (0,5; 1; 1,5; 2 e 2,5 mm) para os três adesivos estudados (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752).

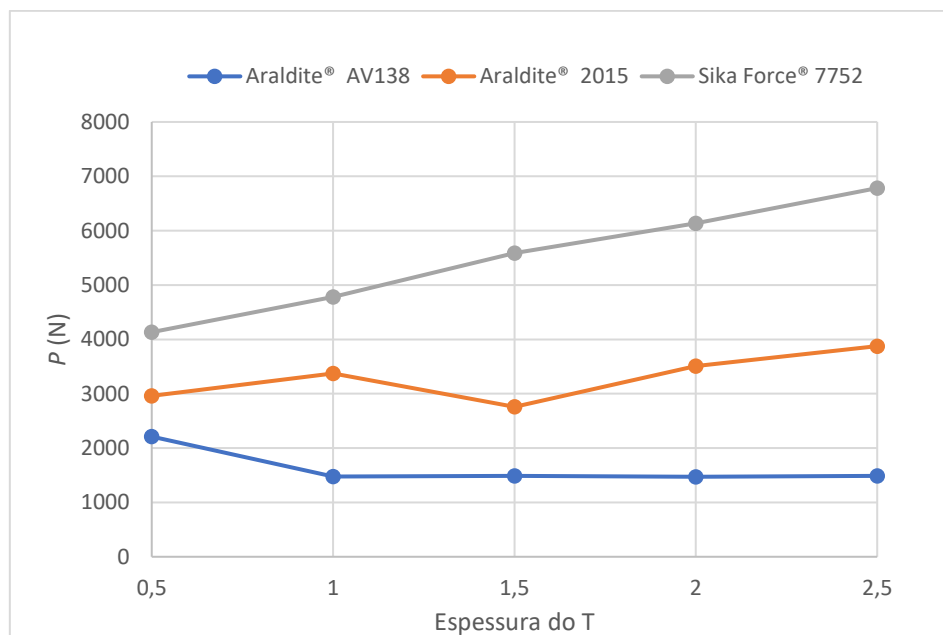


Figura 107 - Valores de $P_{\text{máx}}$ para os diferentes valores de t .

Como se pode verificar, as $P_{\text{máx}}$ de maior valor registam-se para o adesivo SikaForce® 7752, que apresenta maior ductilidade. Esse facto traduz-se num aumento da plasticidade do adesivo, que origina forças mais elevadas. De outro modo verifica-se que, para os dois adesivos menos dúcteis (Araldite® AV138 e Araldite® 2015), o aumento do valor de t traduz-se em comportamentos bastante dispares. No caso do adesivo

Araldite® AV138, o aumento do t praticamente não altera $P_{\text{máx}}$, com exceção para $t = 0,5$ mm. Para esta geometria, o modo de rotura registado foi diferente em comparação com os restantes valores de t . Para o Araldite® 2015, registou-se uma quebra de $P_{\text{máx}}$ para $t = 1,5$ mm devido à alteração do modo de rotura.

3.2.8.3 Comprimento de sobreposição

Na Figura 108 estão representadas as curvas P - δ para todos os valores de l (10, 20, 30 e 40 mm) para o adesivo Araldite® AV138.

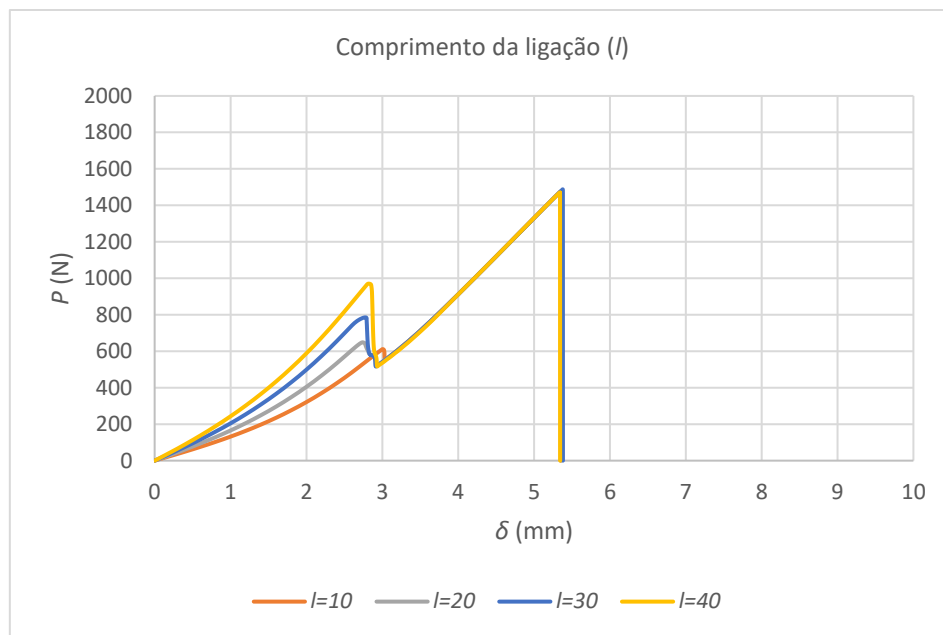


Figura 108 - Curva P - δ para os diferentes valores de l (Araldite® AV138).

Através da análise das curvas P - δ verificou-se que o aumento do valor de l não se traduz num aumento dos valores de $P_{\text{máx}}$. De facto, para todos os valores de l , a força máxima registada é praticamente igual. Este facto deve-se às tensões σ_y e τ_{xy} que se concentram num comprimento muito reduzido da camada de adesivo e que aumentam com l (Figura 66 e Figura 78). Sendo este adesivo bastante rígido, as tensões de arrancamento são maiores nesse ponto quando comparadas com os restantes adesivos. Como este adesivo é frágil, o aumento de l e consequente agravamento dos picos de tensão não se traduzem num aumento de $P_{\text{máx}}$. Em relação ao deslocamento de rotura, o mesmo também se manteve constante para os diferentes valores de l . Através do modo de rotura (Figura 94 e Figura 93), é possível comprovar que o modo de rotura é idêntico para os valores testados de l , o que corrobora os resultados obtidos. Quando o adesivo atingiu $P_{\text{máx}}$, a percentagem de rotura foi bastante alta e o adesivo estava praticamente todo em rotura, qualquer que fosse o valor de l .

Na Figura 109 estão representadas as curvas P - δ para todos os valores de l (10, 20, 30 e 40 mm) para o adesivo Araldite® 2015.

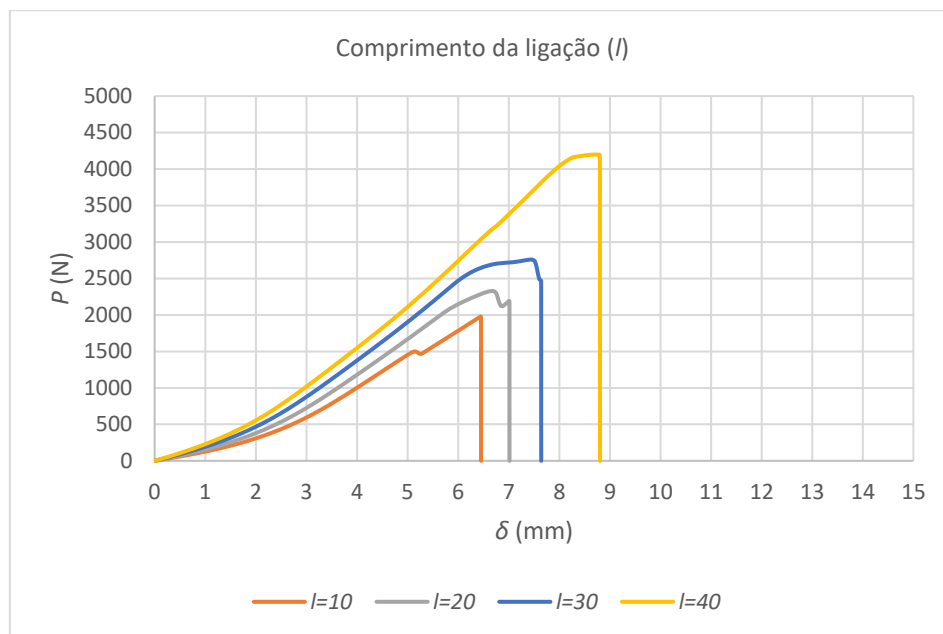


Figura 109 - Curva P - δ para os diferentes valores de l (Araldite® 2015).

Como é possível observar, o aumento dos valores de l faz aumentar o valor de $P_{\text{máx}}$ de forma sustentada. Na Figura 67 e Figura 79 é possível observar um aumento dos picos de tensão σ_y e τ_{xy} em $x/l=0$ com o aumento de l , mas uma diminuição em relação ao adesivo Araldite® AV138. Sendo este um adesivo mais dúctil, o aumento de área de sobreposição leva a uma maior área de plastificação e consequentemente a uma maior distribuição de tensões. Por outro lado, este aumento de área traduziu-se num aumento de $P_{\text{máx}}$. Em relação ao deslocamento de rotura, o mesmo é superior relativamente ao Araldite® AV138, o que se deve ao aumento da ductilidade do adesivo. Através da análise de dano (Figura 94), é possível observar que a percentagem de adesivo em rotura diminui bastante em comparação com o Araldite® AV138.

Na Figura 110 estão representadas as curvas P - δ para todos os valores de l (10, 20, 30 e 40 mm) para o adesivo SikaForce® 7752. Como se pode observar na figura, o aumento de l provoca um aumento de $P_{\text{máx}}$, especialmente entre $l=10$ e 20 mm. Para os restantes valores de l , as curvas P - δ foram bastante semelhantes. Verifica-se que as $P_{\text{máx}}$ atingidas com este adesivo foram bastante superiores em comparação com os restantes. Este facto está ligado com a flexibilidade e ductilidade do adesivo SikaForce® 7752, que é capaz de distribuir as tensões de uma forma mais uniforme em toda a camada do adesivo e, posteriormente, de promover a plastificação da camada de adesivo. Na Figura 68 e Figura 80, é possível observar que as tensões σ_y e τ_{xy} aumentam com l , mas diminuem bastante em comparação com os outros dois adesivos. O deslocamento de rotura também aumentou ligeiramente com o aumento dos valores de l e a única exceção também foi para $l=1$ mm. De um modo geral, o deslocamento atingido é maior relativamente aos adesivos referidos anteriormente. Este facto também se deve ao aumento significativo da ductilidade do adesivo. Ao analisar a variável de dano quando

se atinge $P_{\text{máx}}$ (Figura 96), verifica-se que este adesivo não entra em rotura e que praticamente toda a sua camada se encontra em dano.

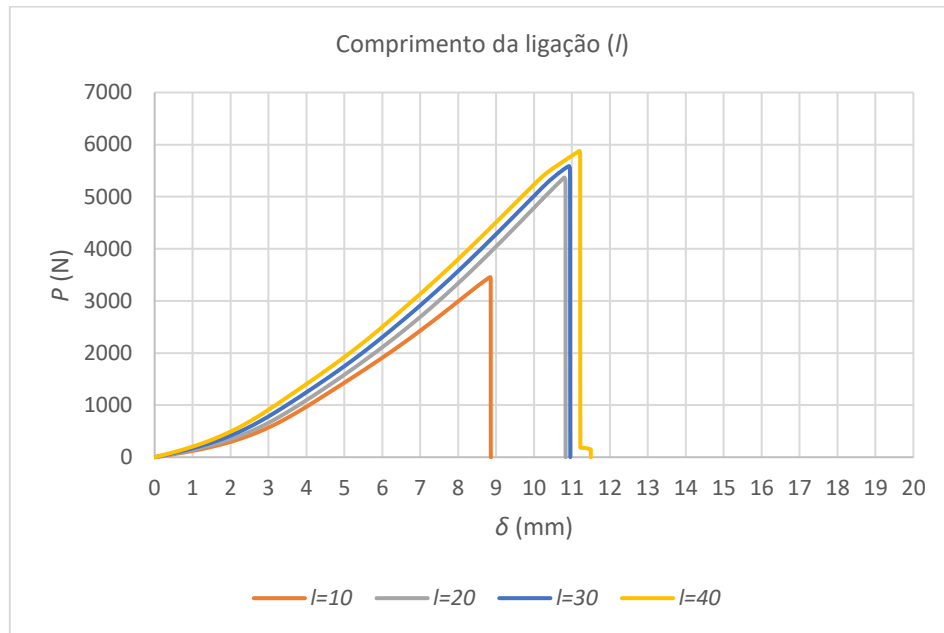


Figura 110 - Curva P - δ para os diferentes valores de l (SikaForce® 7752).

Na Figura 111 estão representados os valores de $P_{\text{máx}}$ para todos os valores de l (10, 20, 30 e 40 mm) para os três adesivos estudados (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752).

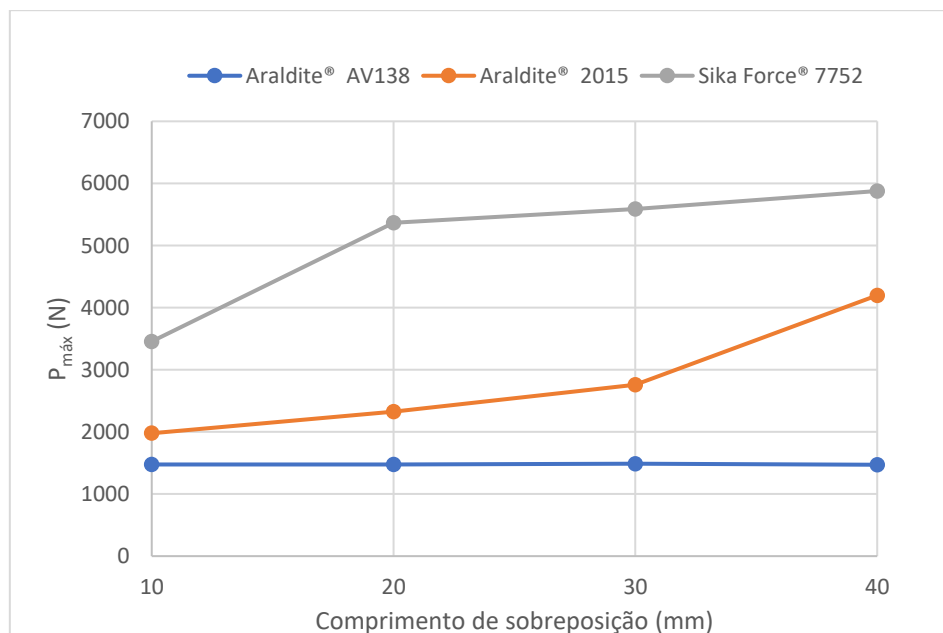


Figura 111 - Valores de $P_{\text{máx}}$ para os diferentes valores de l .

As forças $P_{\text{máx}}$ mais elevadas registam-se em adesivos com maior ductilidade, sendo o adesivo SikaForce® 7752 o mais dúctil. Verifica-se que o adesivo Araldite® 2015 e o

adesivo SikaForce® 7752 têm comportamentos semelhantes com o aumento dos valores de l . De facto, regista-se um aumento das forças $P_{\text{máx}}$ com o aumento dos valores de l . O adesivo Araldite® AV138 praticamente não altera os valores de $P_{\text{máx}}$ com o aumento dos valores de l . Devido à elevada rigidez deste adesivo, é possível observar através do modo de rotura que o mesmo não permite plastificação.

3.2.8.4 Raio do T

Na Figura 112 estão representadas as curvas P - δ para todos os valores de r (3, 6, 9 e 12 mm) para o adesivo Araldite® AV138.



Figura 112 - Curva P - δ para os diferentes valores de r (Araldite® AV138).

Através da análise das curvas P - δ verificou-se que, para este adesivo, a variável r praticamente não teve influência na resistência da junta. Analisando o gráfico de tensões σ_y e τ_{xy} no adesivo (Figura 69 e Figura 81), foi possível verificar que as concentrações de tensões se localizaram numa zona muito concentrada em $x/l=0$ e que não variaram significativamente com r . Devido a este facto, a variável r não alterou a resistência da junta. De facto, este efeito também acontece em função de l . Em relação ao deslocamento de rotura, este também se manteve constante. Através do modo de rotura (Figura 94 e Figura 93), é possível justificar este comportamento, na medida em que a percentagem de rutura é idêntica para todos os valores de r .

Na Figura 113 estão representadas as curvas P - δ para todos os valores de r (3, 6, 9 e 12 mm) para o adesivo Araldite® 2015.

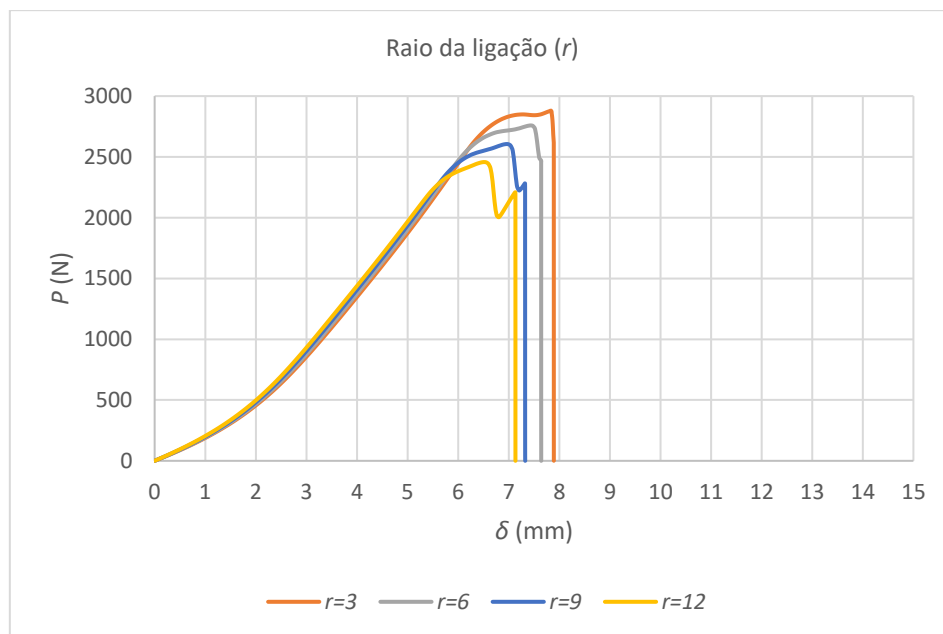


Figura 113 - Curva P - δ para os diferentes valores de r (Araldite® 2015).

Através da análise das curvas P - δ verificou-se que os valores de $P_{\text{máx}}$ aumentam com a diminuição dos valores r , contrariamente ao comportamento registado no Araldite® AV138. Analisando o gráfico de tensões σ_y e τ_{xy} no adesivo (Figura 70 e Figura 82), verificou-se que, com a variação de r , as tensões se mantiveram constantes em $x/l \approx 0$. Por outro lado, para $x/l \approx 0,8$ as tensões variaram com r . Com a diminuição de r , há um aumento da concentração de tensões em $x/l \approx 0,8$. Em relação ao deslocamento de rotura, o mesmo diminui com o aumento dos valores de r . No entanto, registou-se um ligeiro aumento em comparação com o Araldite® AV138. Analisando o modo de rotura (Figura 98), registou-se uma diminuição da percentagem de adesivo em rotura com o aumento dos valores de r em relação ao Araldite® AV138, que se justifica com o aumento da plasticidade do adesivo.

Na Figura 114 estão representadas as curvas P - δ para todos os valores de r (3, 6, 9 e 12 mm) para o adesivo SikaForce® 7752. Verificou-se que $P_{\text{máx}}$ aumenta com o aumento de r . Para $r=9$ e $r=12$ mm, registaram-se valores praticamente iguais. Analisando o gráfico de tensões σ_y e τ_{xy} na junta (Figura 71 e Figura 83) verificou-se que os valores registados foram bastante inferiores comparativamente aos outros dois adesivos, o que se traduziu num aumento de valores $P_{\text{máx}}$ significativo. Por outro lado, com o aumento dos valores de r , o deslocamento de rotura também aumenta. A exceção registou-se também para $r=9$ e $r=12$ mm, com valores de descolamento semelhantes. Com o aumento de rigidez na zona $x/l \approx 0,8$, onde se registaram também picos de tensões, e com o aumento da ductilidade do adesivo, o deslocamento e o valor de $P_{\text{máx}}$ também aumentaram.

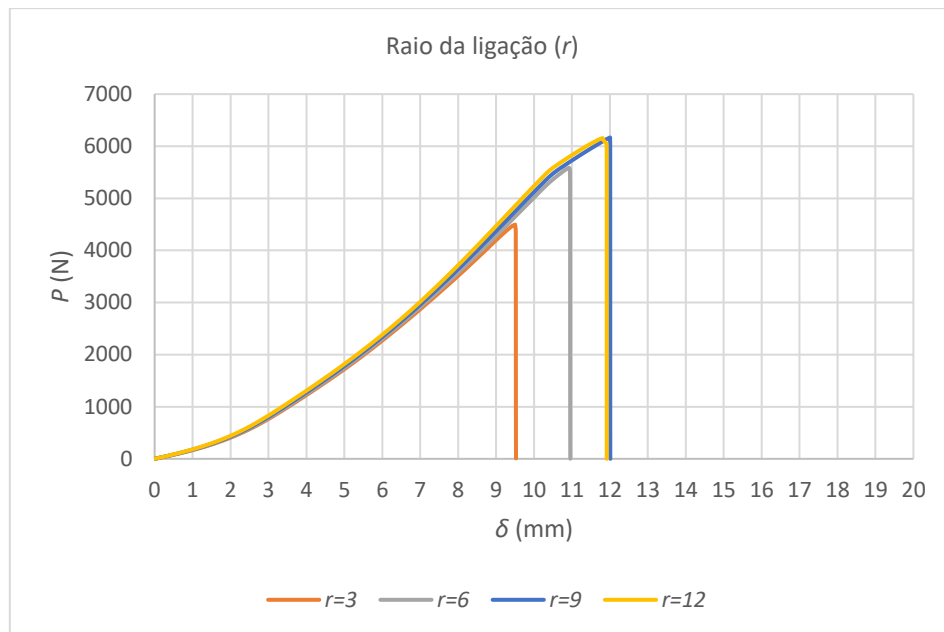


Figura 114 - Curva P - δ para os diferentes valores de r (SikaForce® 7752).

Na Figura 115 estão representados os valores de $P_{\text{máx}}$ para todos os valores de r (3, 6, 9 e 12 mm) para os três adesivos estudados (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752).

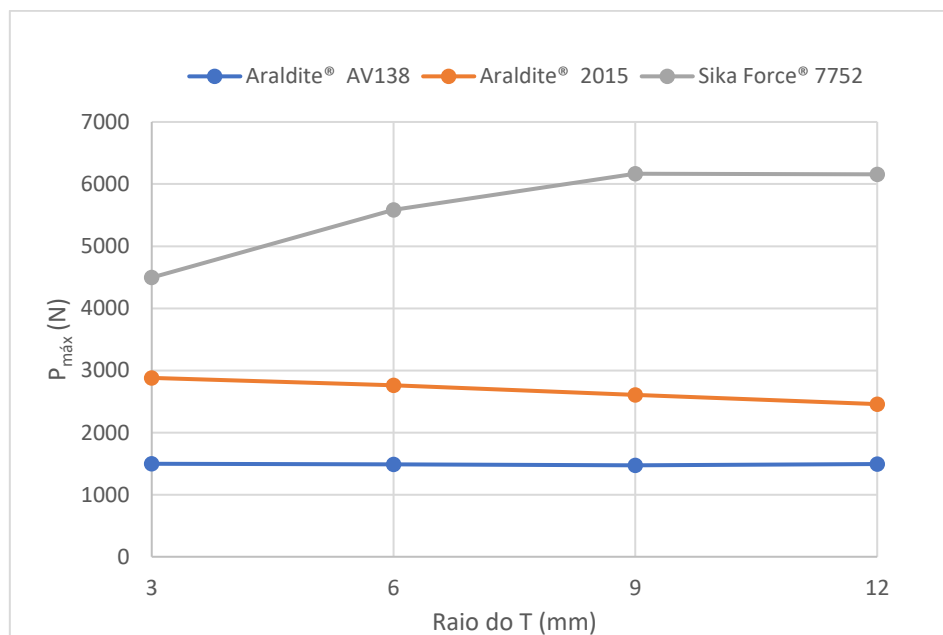


Figura 115 - Valores de $P_{\text{máx}}$ para os diferentes valores de r .

Através da análise da Figura 115, verificou-se que esta variação de geometria provoca comportamentos distintos entre os três adesivos. Para o adesivo mais frágil (Araldite® AV138), o aumento do valor de r não aumentou $P_{\text{máx}}$. Por outro lado, o adesivo com maior ductilidade (SikaForce® 7752), registou valores $P_{\text{máx}}$ bastante elevados e

crecentes com o aumento de r . Para adesivo Araldite® 2015, observou-se um comportamento contrário, ou seja, com o aumento dos valores de r , há uma diminuição da resistência máxima da junta.

3.2.9 Previsão da energia dissipada

Este subcapítulo tem como objetivo o estudo da dissipação de energia registada (U) para os três adesivos (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752) e para as várias geometrias. Os valores da energia dissipada foram obtidos através das curvas $P-\delta$ que foram retiradas numericamente através do *software* ABAQUS®. Para isso foi calculada a área de cada curva $P-\delta$ para cada junta adesiva com o auxílio do *software* Microsoft® Excel.

3.2.9.1 Espessura da base

Na Figura 116 estão representados os valores de U para todos os valores de a (1, 2, 3 e 4 mm) para os três adesivos estudados (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752).

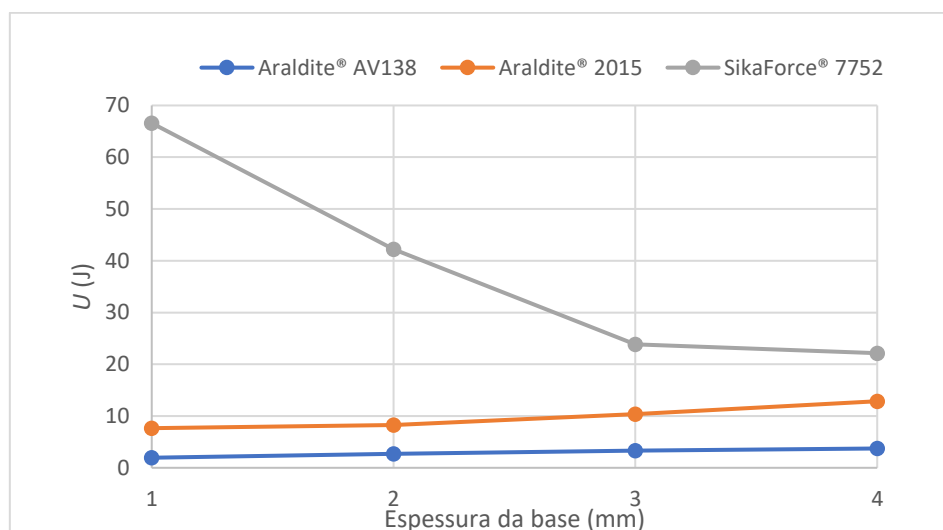


Figura 116 – Valores da energia dissipada para os diferentes valores de a .

Conforme é possível verificar, o adesivo SikaForce® 7752 regista os maiores valores de U quando comparado com os outros dois adesivos. Este facto deve-se sobretudo à elevada ductilidade do adesivo SikaForce® 7752. Em relação ao valor de U em função de a , verificou-se que os três adesivos tiveram diferentes comportamentos. No caso do Araldite® AV138, não houve grande valor de U e observou-se um valor máximo para $a=3$ mm. No caso do Araldite® 2015, houve um ligeiro aumento de U com o aumento de a devido ao aumento significativo de $P_{máx}$, embora a junta se torne mais rígida. Por fim, para o SikaForce® 7752 registou-se um valor de U elevado para $a=1$ e $a=2$ mm. Para $a=1$ mm, registou-se a rotura do substrato, o que fez aumentar bastante o deslocamento de rotura e consequentemente o valor de U . De um modo geral, para este adesivo, o

aumento de α incrementa significativamente a rigidez da ligação e, consequentemente, regista-se um aumento de U .

3.2.9.2 Espessura do T

Na Figura 117 está representada U para todos os valores de t (0,5; 1, 1,5; 2 e 2,5 mm) para os três adesivos estudados (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752).

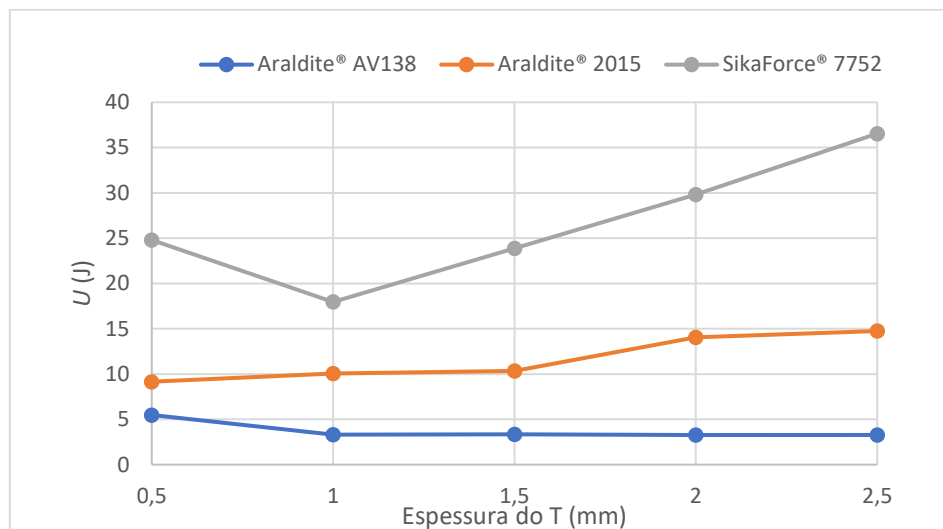


Figura 117 - Valores da energia dissipada para os diferentes valores de t .

Verifica-se que o adesivo SikaForce® 7752 regista maiores valores de U quando comparado com os outros dois adesivos. Este facto deve-se também à elevada ductilidade do adesivo SikaForce® 7752. Em relação ao U em função de t para o Araldite® AV138, não houve grande dissipação de energia e a mesma manteve-se praticamente constante, com exceção em $t=0,5$ mm. De facto, para $t=0,5$ mm o modo de rotura foi diferente dos restantes devido à diminuição de rigidez da junta, o que provocou um aumento de $P_{\text{máx}}$ e deslocamento de rotura. No caso do Araldite® 2015, houve um ligeiro aumento da U para $t=2$ e 2,5 mm e este facto é devido ao aumento de $P_{\text{máx}}$ e deslocamento para esses dois valores. Por fim, para o SikaForce® 7752 registou-se um valor de U elevado para $t=0,5$ mm, superior a $t=1$ e $t=1,5$ mm. De facto, a forma esbelta do T, aliada à elevada ductilidade do adesivo, fez aumentar o valor do deslocamento e consequentemente a energia dissipada. Após $t=0,5$ mm a energia dissipada aumenta gradualmente com o aumento do valor de t devido à correspondente aumento de $P_{\text{máx}}$ e deslocamento de rotura.

3.2.9.3 Comprimento de sobreposição

Na Figura 118 está representada U para todos os valores de l (10, 20, 30 e 40 mm) para os três adesivos estudados (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752).

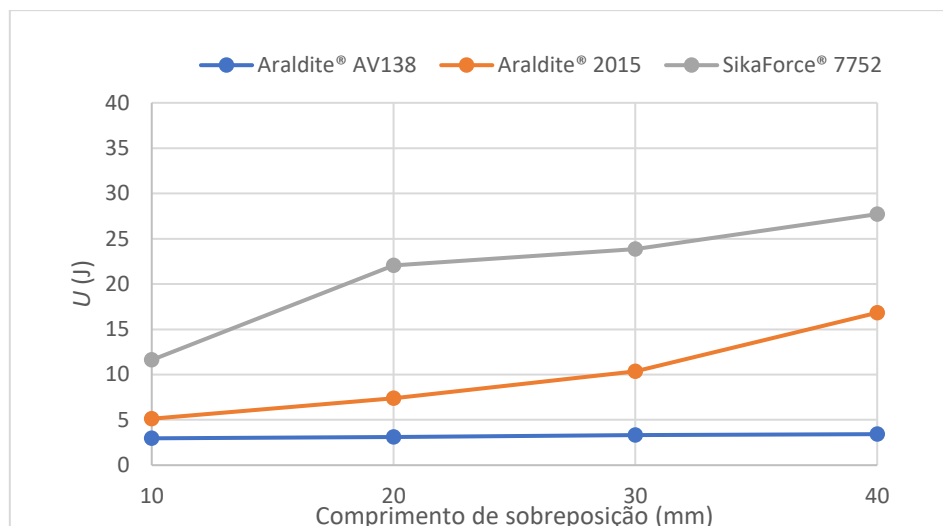


Figura 118 - Valores da energia dissipada para os diferentes valores de l .

Conforme é possível verificar, o adesivo SikaForce® 7752 regista novamente os maiores valores de U quando comparado com os outros dois adesivos. Este facto deve-se sobretudo à elevada ductilidade do adesivo SikaForce® 7752, conforme já referido. De um modo geral, U aumenta com o aumento do valor de l , exceto para o adesivo Araldite® AV138, que obteve valores praticamente constantes devido à pouca influência de l no comportamento da junta. Para os adesivos mais dúcteis, o aumento de l , traduziu-se num aumento de $P_{\text{máx}}$, o que se reflete no aumento de U .

3.2.9.4 Raio do T

Na Figura 119 apresenta-se U para todos os valores de r (3, 6, 9 e 12 mm) para os três adesivos estudados (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752).

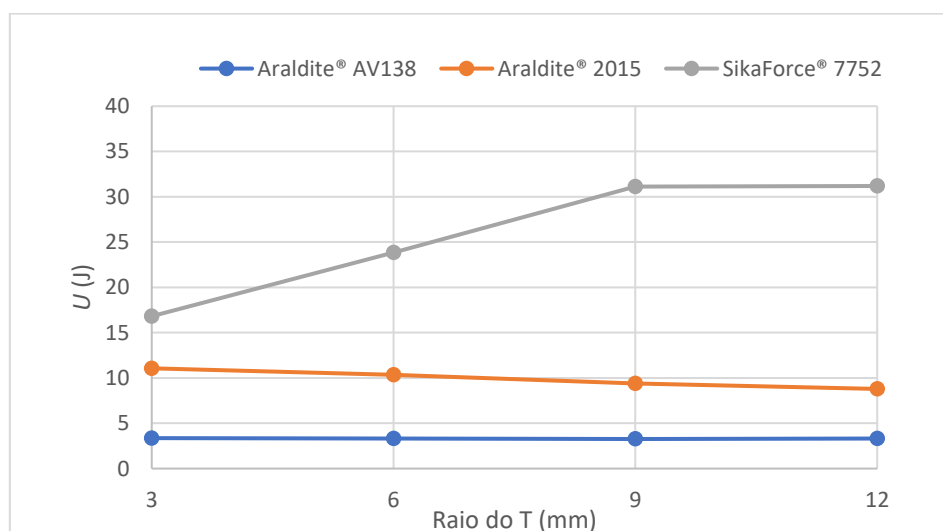


Figura 119 - Valores da energia dissipada para os diferentes valores de r .

Para os diferentes valores de r , o adesivo SikaForce® 7752 regista novamente os maiores valores de U devido à sua ductilidade superior. Por outro lado, os valores da energia dissipada registam comportamentos bastante díspares entre adesivos. No caso do SikaForce® 7752, a energia aumenta com o aumento de r , mas observa-se um patamar entre $r=9$ e 12 mm em que o valor de U se manteve praticamente constante. Este comportamento traduz uma estabilização no comportamento da junta para estes valores de r . Para o adesivo com ductilidade intermédia, Araldite® 2015, verificou-se que com o aumento de r , registou-se uma diminuição gradual do valor de U , que está relacionada com a redução de $P_{\text{máx}}$. Por fim, para o Araldite® AV138, os valores de U registados foram praticamente iguais, devido às curvas $P-\delta$ serem bastante semelhantes, o que significa que a fragilidade do adesivo fez com que o valor de r não tivesse efeito no comportamento da junta.

3.2.10 Análise dos resultados obtidos

Através da análise dos resultados obtidos nos subcapítulos anteriores, nomeadamente a análise de tensões, estudo da varável de dano, previsão de resistência e previsão de energia dissipada, foi possível concluir que os três adesivos apresentam uma ductilidade bastante distinta. De facto, o adesivo Sikaforce® 7752 apresenta uma ductilidade muito superior ao Araldite® 2015 e ao Araldite® AV138. Este último revelou-se um adesivo bastante frágil. No entanto, um adesivo mais dúctil não significa que possua obrigatoriamente uma resistência de junta superior. Nas juntas em T estudadas, o adesivo com maior rigidez (Araldite® AV138) atinge na extremidade da junta adesiva ($x/l=0$) tensões bastante elevadas para uma solicitação relativamente reduzida, não possibilita uma melhor distribuição dos esforços e provoca tensões elevadas numa área muito reduzida de sobreposição. Como consequência, não se obtiveram valores significativamente altos de resistência. Por outro lado, os adesivos mais flexíveis e com maior ductilidade (Sikaforce® 7752 e Araldite® 2015) possuem normalmente uma resistência inferior. Porém, no caso das juntas em T estudadas, estes adesivos apresentam distribuições de tensões mais uniformes e com valores de pico com menor valor normalizado. Para além disso, a sua deformação plástica torna as juntas mais resistentes em comparação com juntas de adesivos frágeis.

Em relação às variáveis geométricas estudadas (a , t , l e r), as mesmas apresentaram resistências diferentes quando solicitadas a esforços de arrancamento. Para o adesivo mais rígido (Araldite® AV138) as alterações geométricas da junta praticamente não tiveram grande efeito na resistência, com a exceção do aumento de a , que se traduziu num aumento de resistência. Em relação aos dois adesivos mais dúcteis (Sikaforce® 7752 e Araldite® 2015), a variação de geometria originou resistências diferentes entre si. No caso do adesivo Sikaforce® 7752, o aumento do valor das diferentes variáveis geométricas traduziu-se num aumento de resistência e rigidez da junta. Esse aumento das variáveis geométricas, aliado à ductilidade do adesivo, aumentou consideravelmente os valores de $P_{\text{máx}}$ e de deslocamento de rotura. Por último, para o

adesivo Araldite® 2015, o aumento do valor das diferentes variáveis geométricas traduziu-se em resultados bastante diferentes no que concerne à resistência máxima. De facto, o aumento do valor de r não se traduziu num aumento de resistência mas sim numa diminuição.

A junta com maior valor de $P_{\text{máx}}$ (6782,96 N) foi obtida usando o adesivo Sikaforce® 7752 e com a geometria $a=3$, $t=2,5$, $\alpha=30$ e $r=3$ mm, ou seja, com a espessura do T máxima. No caso do Araldite® 2015, a junta que atingiu o maior valor de resistência máxima (4198,34 N) foi com a geometria $a=3$, $t=1,5$, $\alpha=40$ e $r=3$ mm, ou seja, com o maior valor de comprimento de sobreposição. Por último, para o adesivo menos dúctil, a junta com maior resistência (2210,98 N) foi com a geometria $a=3$, $t=0,5$, $\alpha=30$ e $r=3$ mm, ou seja, com o menor valor da espessura do T. Através destes valores máximos registados para cada um dos adesivos, foi possível verificar a grande diferença de resistência entre ambos.

CONCLUSÕES

4 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo estudar, através de análise numérica (MDC), o comportamento de ligações adesivas em T entre substratos de alumínio, considerando diferentes variáveis geométricas (a , t , l e r) e adesivos com ductilidade distinta. Numericamente, foi efetuada uma análise de tensões, análise de dano, previsão da resistência e previsão da energia dissipada, através do *software* ABAQUS®, com o objetivo de avaliar a influência das variáveis geométricas e dos três tipos de adesivo em estudo.

Foi estudada uma configuração de junta tipicamente de arrancamento. Durante a análise foi possível verificar o aparecimento de tensões de corte na camada de adesivo, embora de valor inferior relativamente às tensões de arrancamento registadas. Foi concluído que os picos de tensões de arrancamento ocorrem para todas as configurações de junta em $x/l=0$, na extremidade mais solicitada, e na zona de início do raio, em $x/l \approx 0,8$. Os valores mais elevados foram registados para as juntas com o adesivo Araldite® AV138, devido à sua elevada rigidez. Este adesivo provocou uma tensão de arrancamento elevada numa área muito reduzida de sobreposição. Por outro lado, as tensões de arrancamento foram significativamente menores no SikaForce® 7752, devido à sua baixa rigidez, o que permitiu uma distribuição de tensões mais gradual por uma área maior de sobreposição. No caso do adesivo Araldite® 2015, os picos de tensão foram superiores ao SikaForce® 7752, mas inferiores ao Araldite® AV138. Por outro lado, foi possível concluir que, devido ao SikaForce® 7752 ser bastante dúctil, as resistências obtidas foram mais elevadas, e que a sua ductilidade é bastante importante para uma elevada resistência de junta, conforme demonstrado pelos resultados numéricos. A análise de tensões também permitiu concluir que, para os três adesivos estudados, quanto menor for o valor de a , maior é o pico tensão de arrancamento no adesivo. Este efeito foi maior no adesivo mais frágil e registou o maior valor de tensão quando comparado com as outras variáveis estudadas.

Foi também discutida a variável de dano (SDEG) nos elementos coesivos do adesivo no instante de $P_{máx}$, para uma melhor perceção do processo de rotura. Foi possível concluir que a rigidez dos adesivos teve um papel bastante importante no modo de rotura ocorrido. No caso do adesivo mais frágil (Araldite® AV138) foi possível verificar que, para todas as variáveis geométricas estudadas, o adesivo apresentou uma percentagem bastante alta de rotura. A elevada rigidez deste adesivo não possibilita a absorção dos picos de tensão gerados. Para o adesivo com rigidez intermédia (Araldite® 2015), a percentagem de adesivo em rotura diminui bastante em comparação com o adesivo

Araldite® AV138. Aumentando a ductilidade do adesivo, é aumentada a quantidade de adesivo em dano. Por fim, para o adesivo com maior ductilidade (SikaForce® 7752) verificou-se que, quando $P_{\text{máx}}$ é atingida, a percentagem de adesivo em rotura é praticamente nula, embora a percentagem de adesivo em dano seja muito elevada. Por fim, as variáveis geométricas também tiveram um papel importante no comportamento das juntas ao dano. De facto, quando a geometria do T é mais esbelta, ou seja, menos rígida, verificou-se uma alteração do modo de rotura e do local de início de dano.

No que concerne à resistência das juntas, a utilização do adesivo mais dúctil resultou em maiores valores de $P_{\text{máx}}$ atingidos. De facto, o adesivo SikaForce® 7752 registou valores bastante acima em comparação com os outros dois adesivos. Com o aumento do valor das variáveis geométricas, verificou-se um aumento de $P_{\text{máx}}$. Para o adesivo com rigidez intermédia (Araldite® 2015), o aumento do valor das variáveis geométricas revelou comportamentos bastante diferentes. Com o aumento de a e o aumento de l , registou-se um aumento de $P_{\text{máx}}$. No entanto, os aumentos de t e r não se traduziram num aumento de $P_{\text{máx}}$. Por fim, no caso do adesivo Araldite® AV138, o aumento do valor das variáveis geométricas não se traduziu num aumento de $P_{\text{máx}}$, com exceção do aumento de a , que aumentou a resistência da junta. A elevada rigidez deste adesivo não permitiu grande ganho de resistência numa junta T.

Em relação a U , a mesma está de certa forma relacionada com a resistência das juntas. Foi possível concluir que o adesivo SikaForce® 7752 regista os maiores valores de U quando comparado com os outros dois adesivos. Este facto deve-se sobretudo à elevada ductilidade do adesivo SikaForce® 7752. No caso do adesivo com menor ductilidade, o Araldite® AV138, registaram-se pequenas variações do valor de U , para diferentes geometrias. Por fim, para o adesivo Araldite® 2015, que possui ductilidade intermédia, a variação dos valores de U registados foi bastante díspar. No entanto, este adesivo registou valores de U superiores ao Araldite® AV138 e inferiores ao SikaForce® 7752, como era esperado.

Como conclusão, o adesivo com elevada ductilidade (Sikaforce® 7752) revelou-se o mais recomendado para este tipo de solicitação, devido à capacidade de distribuir tensões sobre uma maior área, o que traduziu em valores mais elevados de $P_{\text{máx}}$.

Como sugestões de trabalhos futuros, referem-se os seguintes:

- Fabricação das juntas T por maquinaria e posteriores ensaios experimentais;
- Estudar o comportamento das juntas com outra variável geométrica, como t_a ;
- Utilizar adesivos com ductilidade semelhante de forma a dar ênfase às variáveis geométricas;
- Utilizar a lei trapezoidal para modelar adesivos dúcteis;
- Estudo do comportamento das juntas T à fadiga;
- Considerar técnica de Taguchi para avaliar o parâmetro geométrico com maior peso no comportamento das juntas.

REFERÊNCIAS

5 REFERÊNCIAS

1. Kim, Y.T., M.J. Lee, e B.C. Lee, *Simulation of adhesive joints using the superimposed finite element method and a cohesive zone model*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2011. **31**(5): p. 357-362.
2. Petrie, E.M., *Handbook of adhesives and sealants*. 2000, New York: McGraw Hill.
3. Da Silva, L.F., A. Öchsner, e R.D. Adams, *Handbook of adhesion technology*. 2011: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
4. Da Silva, L.F.M., A.G. De Magalhães, e M.F.S.F. De Moura, *Juntas adesivas estruturais*. 2007, Porto: Publindustria.
5. Pinto, A.M.G., *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*. 2007, Doutoramento em Engenharia Mecânica: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
6. Pocius, A.V., *Adhesion and Adhesives Technology: An Introduction*. 1996, Munich: Hanser Verlag.
7. Corporation, H. *User's guide adhesives 02.14_EN_EU*. 2014 11-10-2019]; Available from: https://us.aralditeadhesives.com/files/USER-GUIDE_Adhesives-technology.pdf.
8. Cognard, P., *Handbook of adhesives and sealants: basic concepts and high tech bonding*. Vol. 1. 2005: Elsevier.
9. Qiu, J. e Q. Sun, *Rear fuselage stiffness design of T-tail*. Composite Structures, 2013. **100**: p. 163-172.
10. SatyanarayanaGupta, M. e K. Veeranjanyulu, *Fabrication and Anayisis of Adhesive joints Used in Aircraft Structures, Materials Today: Proceedings*. Elsevier, 2017. **4**(8): p. 8279-8286.
11. M, A. *Structural Adhesives Lighten the Load*. 2019 19/10/2019]; Available from: <https://www.autobeatonline.com/articles/structural-adhesives-lighten-the-load>.
12. Grant, L.D.R., R.D. Adams, e L.F.M. Da Silva, *Experimental and numerical analysis of single-lap joints for the automotive industry*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2009. **29**(4): p. 405-413.
13. Campilho, R.D.S.G., M.D. Banea, A.M.G. Pinto, L.F.M. Da Silva, e A.M.P. De Jesus, *Strength prediction of single-and double-lap joints by standard and extended finite element modelling*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2011. **31**(5): p. 363-372.
14. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. De Moura, e J.J.M.S. Domingues, *Modelling single and double-lap repairs on composite materials*. Composites Science and Technology, 2005. **65**(13): p. 1948-1958.
15. Aydin, M.D. e S. Akpinar, *The strength of the adhesively bonded T-joints with embedded supports*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2014. **50**: p. 142-150.

16. McGregor, I.J., I. Gao, P. Sheasby, e I. Wilson. *Weld-bonding: a joining technology for aluminum structured vehicles*. 1995. Proceedings of International Body Engineering Conference, Automotive Body Materials Section, Detroit.
17. Hunter, J.A., D. Nardini, Y. Gao, e R.A. Ricks, *Design and production of adhesively bonded aluminium automotive structures*. Proceedings of the ISATA. Vol. 31. 1998.
18. Beevers, A., S.M. Steidler, J. Durodola, e M. Coackley, *Analysis of stiffness of adhesive joints in car bodies*. Journal of Materials Processing Technology, 2001. **118**(1-3): p. 95-100.
19. Hemanth, B., N.C.M. Babu, H.G. Shivakumar, e S. Srikari. *Design and analysis of grid stiffened fuselage panel with curved stiffeners*. in *AIP Conference Proceedings*. 2018. AIP Publishing.
20. Li, W., L. Blunt, e K.J. Stout, *Analysis and design of adhesive-bonded tee joints*. International Journal of Adhesion, 1997. **17**(4): p. 303-311.
21. Zhan, X., C. Gu, H. Wu, H. Liu, J. Chen, J. Chen, e Y. Wei, *Experimental and numerical analysis on the strength of 2060 Al-Li alloy adhesively bonded T joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2016. **65**: p. 79-87.
22. Zhang, K., L. Li, Y. Duan, e Y. Li, *Experimental and theoretical stress analysis for an interface stress model of single-L adhesive joints between CFRP and aluminum components*. International Journal of Adhesion Adhesives, 2014. **50**: p. 37-44.
23. Guo, S. e R. Morishima, *Numerical analysis and experiment of composite sandwich T-joints subjected to pulling load*. Composite Structures, 2011. **94**(1): p. 229-238.
24. Volkersen, O., *Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten*. 1938. **15**: p. 41-47.
25. Goland, M., *The stresses in cemented joints*. Journal of Applied Mechanics, 1944. **17**: p. 66.
26. Adams, R.D., *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1974. **9**(3): p. 185-196.
27. Harris, J.A. e R.A. Adams, *Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods*. International Journal of Adhesion Adhesives, 1984. **4**(2): p. 65-78.
28. Sosa, J.L.C. e N. Karapurath, *Delamination modelling of GLARE using the extended finite element method*. Composites Science Technology, 2012. **72**(7): p. 788-791.
29. Neto, J.A.B.P., R.D.S.G. Campilho, e L.F.M. Da Silva, *Parametric study of adhesive joints with composites*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2012. **37**: p. 96-101.
30. Khoramishad, H., A.D. Crocombe, K.B. Katnam, e I.A. Ashcroft, *Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model*. International Journal of Fatigue, 2010. **32**(7): p. 1146-1158.
31. Daudeville, L. e P. Ladeveze, *A damage mechanics tool for laminate delamination*. Composite Structures, 1993. **25**(1-4): p. 547-555.
32. Kattan, P.I. e G.Z. Voyiadjis, *Decomposition of damage tensor in continuum damage mechanics*. Journal of Engineering Mechanics, 2001. **127**(9): p. 940-944.
33. Shenoy, V., I.A. Ashcroft, G.W. Critchlow, e A.D. Crocombe, *Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded*

- joints subjected to variable amplitude fatigue*. Engineering Fracture Mechanics, 2010. **77**(7): p. 1073-1090.
34. Mohammadi, S., *Extended finite element method for isotropic problems, extended finite element method*. 2008, New Jersey: Blackwell Publishing Ltd.
35. Belytschko, T. e T. Black, *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. International Journal For Numerical Methods In Engineering, 1999. **45**(5): p. 601-620.
36. Moës, N., J. Dolbow, e T. Belytschko, *A finite element method for crack growth without remeshing*. International Journal For Numerical Methods In Engineering, 1999. **46**(1): p. 131-150.
37. Adams, R.D., J. Comyn, e W.C. Wake, *Structural Adhesive Joints In Engineering*. 1997, Berlin: Springer.
38. Panigrahi, S.K. e B. Pradhan, *Three dimensional failure analysis and damage propagation behavior of adhesively bonded single lap joints in laminated FRP composites*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2007. **26**(2): p. 183-201.
39. Griffith, A.A., *The Phenomena of Rupture and Flow in Solids*. . Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1921. **221**: p. 163-198.
40. Williams, M.L., *The stresses around a fault or crack in dissimilar media*. Bulletin of the Seismological Society of America, 1959. **49**(2): p. 199-204.
41. Hutchinson, J., *Plastic stress and strain fields at a crack tip*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1968. **16**(5): p. 337-342.
42. Rice, J.R., *A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks*. Journal of Applied Mechanics, 1968. **35**(2): p. 379-386.
43. Fernlund, G. e J.K. Spelt, *Failure load prediction of structural adhesive joints*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 1991. **11**(4): p. 221-227.
44. Alfano, G. e M.A. Crisfield, *Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2001. **50**(7): p. 1701-1736.
45. Allix, O. e A.I.j.o.F. Corigliano, *Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens*. International Journal of Fracture, Springer, 1996. **77**(2): p. 111-140.
46. Chandra, N., H. Li, C. Shet, e H. Ghonem, *Some issues in the application of cohesive zone models for metal-ceramic interfaces*. International Journal of Solids Structures, Springer, 2002. **39**(10): p. 2827-2855.
47. Chen, J., *Predicting progressive delamination of stiffened fibre-composite panel and repaired sandwich panel by decohesion models*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2002. **15**(5): p. 429-442.
48. Kafkalidis, M.S. e M.D. Thouless, *The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints*. International Journal of Solids Structures, 2002. **39**(17): p. 4367-4383.
49. Pinto, A.M.G., A.G. Magalhães, R.D.S.G. Campilho, M.F.S.F. De Moura, e A.P.M. Baptista, *Single-lap joints of similar and dissimilar adherends bonded with an acrylic adhesive*. The Journal of Adhesion, 2009. **85**(6): p. 351-376.

50. Liljedahl, C.D.M., A.D. Crocombe, M.A. Wahab, e I.A. Ashcroft, *Damage modelling of adhesively bonded joints*. International Journal of Fracture, 2006. **141**(1-2): p. 147-161.
51. De Moura, M.F.S.F., J.P.M. Gonçalves, A.T. Marques, e P.M.S.T. De Castro, *Prediction of compressive strength of carbon–epoxy laminates containing delamination by using a mixed-mode damage model*. Composite Structures, 2000. **50**(2): p. 151-157.
52. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. De Moura, e J.J.M.S. Domingues, *Stress and failure analyses of scarf repaired CFRP laminates using a cohesive damage model*. Journal of Adhesion Science Technology, 2007. **21**(9): p. 855-870.
53. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. De Moura, e J.J.M.S. Domingues, *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. International Journal of Solids Structures, 2008. **45**(5): p. 1497-1512.
54. De Moura, M.F.S.F., R.D.S.G. Campilho, e J.P.M. Gonçalves, *Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading*. Composites Science Technology, 2008. **68**(10-11): p. 2224-2230.
55. De Moura, M.F.S.F., R.D.S.G. Campilho, e J.P.M. Gonçalves, *Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints*. International Journal of Solids Structures, 2009. **46**(6): p. 1589-1595.
56. Duan, K., X. Hu, e Y.W. Mai, *Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints*. Journal of Adhesion Science Technology, 2004. **18**(1): p. 39-53.
57. Kattan, P.I. e G.Z. Voyiadjis, *Damage mechanics with finite elements: practical applications with computer tools*. 2012: Springer Berlin Heidelberg.
58. Raghavan, P. e S. Ghosh, *A continuum damage mechanics model for unidirectional composites undergoing interfacial debonding*. Mechanics of Materials, 2005. **37**(9): p. 955-979.
59. Wahab, M.M.A., I.A. Ashcroft, A.D. Crocombe, e S.J. Shaw, *Prediction of fatigue thresholds in adhesively bonded joints using damage mechanics and fracture mechanics*. Journal of Adhesion Science Technology, 2001. **15**(7): p. 763-781.
60. Imanaka, M., T. Hamano, A. Morimoto, R. Ashino, e M. Kimoto, *Fatigue damage evaluation of adhesively bonded butt joints with a rubber-modified epoxy adhesive*. Journal of Adhesion Science Technology, 2003. **17**(7): p. 981-994.
61. Hua, Y., A.D. Crocombe, M.A. Wahab, e I.A. Ashcroft, *Continuum damage modelling of environmental degradation in joints bonded with EA9321 epoxy adhesive*. International Journal of Adhesion Adhesives, 2008. **28**(6): p. 302-313.
62. Chen, Z., R.D. Adams, e L.F.M. Da Silva, *Prediction of crack initiation and propagation of adhesive lap joints using an energy failure criterion*. Engineering Fracture Mechanics, 2011. **78**(6): p. 990-1007.
63. Mohammadi, S., *Extended finite element method: for fracture analysis of structures*. 2008, New Jersey: Wiley.
64. *Abaqus Documentation*. 2013, S. Systèmes, Vélizy-Villacoublay.
65. Campilho, R.D.S.G., M.D. Banea, F.J.P. Chaves, e L.F.M. Da Silva, *eXtended Finite Element Method for fracture characterization of adhesive joints in pure mode I*. Computational Materials Science, 2011. **50**(4): p. 1543-1549.

66. Carneiro, M.A.S., *Estudo experimental e numérico de juntas adesivas em T com aderentes de alumínio*. 2016, Mestrado em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica: Instituto Superior de Engenharia do Porto.
67. Campilho, R.D.S.G., M.D. Banea, J.A.B.P. Neto, e L.F.M. Da Silva, *Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer*. International Journal of Adhesion Adhesives, 2013. **44**: p. 48-56.
68. Moreira, P.M.G.P., A.M.P. De Jesus, A.S. Ribeiro, e P.M.S.T. De Castro, *Fatigue crack growth in friction stir welds of 6082-T6 and 6061-T6 aluminium alloys: A comparison*. Theoretical Applied Fracture Mechanics, 2008. **50**(2): p. 81-91.
69. ASTM, *E8M, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. 2004, International: West Conshohocken.
70. Da Silva, L.F.M., R.A.M. Da Silva, J.A.G. Chousala, e A.M.G. Pintob, *Alternative methods to measure the adhesive shear displacement in the thick adherend shear test*. Journal of Adhesion Science Technology, 2008. **22**(1): p. 15-29.
71. Alves, D.L., R.D.S.G. Campilho, R.D.F. Moreira, F.J.G. Silva, e L.F.M. Da Silva, *Experimental and numerical analysis of hybrid adhesively-bonded scarf joints*. International Journal of Adhesion Adhesives, 2018. **83**: p. 87-95.
72. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. De Moura, D.A. Ramantani, J.J.L. Morais, e J.J.M.S. Domingues, *Buckling behaviour of carbon-epoxy adhesively-bonded scarf repairs*. Journal of Adhesion Science Technology, 2009. **23**(10-11): p. 1493-1513.
73. Faneco, T.M.S., *Caraterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade*. 2014, Mestrado em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica: Instituto Superior de Engenharia do Porto.
74. da Silva, L.F.M. e R.D.S.G. Campilho, *Advances in Numerical Modeling of Adhesive Joints*. 2011: Springer.
75. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. De Moura, e J.J.M.S. Domingues, *Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes*. International Journal of Adhesion Adhesives, 2009. **29**(2): p. 195-205.
76. Campilho, R.D.S.G., A.M.G. Pinto, M.D. Banea, R.F. Silva, e L.F.M. Da Silva, *Strength improvement of adhesively-bonded joints using a reverse-bent geometry*. Journal of Adhesion Science Technology, 2011. **25**(18): p. 2351-2368.
77. Azevedo, J.C.S., *Determinação da tenacidade à fratura em corte (G_{IIc}) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Notched Flexure (ENF)*. 2014, Mestrado em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica: Instituto Superior de Engenharia do Porto.